

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN
BETONUN VE BETONARMENİN KALICILIĞINA
(DÜRABİLİTESİNE) ETKİSİ**

İnş. Yük. Müh. Özgür ÇAKIR

**FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi :17 Şubat 2006
Tez Danışmanı :Prof. Dr. Fevziye AKÖZ (Y.T.Ü)
Jüri Üyeleri :Prof. Dr. M. Ali TAŞDEMİR (İ.T.Ü)
:Prof. Dr. Turan ÖZTURAN (B.Ü)
:Prof. Dr. A. Fuat ÇAKIR (İ.T.Ü)
:Doç. Dr. Nabi YÜZER (Y.T.Ü)

İSTANBUL, 2006

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|---|-------|
| SİMGE LİSTESİ | iv |
| KISALTMA LİSTESİ..... | v |
| ŞEKİL LİSTESİ..... | vi |
| ÇİZELGE LİSTESİ | ix |
| ÖNSÖZ | x |
| ÖZET | xi |
| ABSTRACT | xii |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. KONU İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER | 5 |
| 2.1 Kalıcılık..... | 5 |
| 2.1.1 Beton ve Betonarmenin Kalıcılığı | 5 |
| 2.2 Kalıcılığa Etki Eden Faktörler..... | 7 |
| 2.2.1 Aşınma | 7 |
| 2.2.2 Donma-Çözünme Etkisi..... | 8 |
| 2.2.3 Alkali-Agrega Reaksiyonu..... | 9 |
| 2.2.4 Suyun Etkisi | 9 |
| 2.2.4.1 Asitli Suların Etkisi | 11 |
| 2.2.4.2 Sülfatlı Suların Etkisi..... | 11 |
| 2.2.4.3 Klorürlü Suların (Deniz Suyunun) Etkisi | 12 |
| 2.3 Metallerin Korozyonu..... | 13 |
| 2.3.1 Donatının Korozyonu | 14 |
| 2.3.2 Betonarme Donatısında Klorür Korozyonu | 17 |
| 2.3.3 Donatı Korozyonuna Etki Eden Faktörler | 21 |
| 2.3.3.1 Betonun Geçirimsizliği | 21 |
| 2.3.3.2 Karbonatlaşma..... | 26 |
| 2.3.3.3 Puzolan Malzeme Kullanımı..... | 29 |
| 2.3.3.4 Klorürlerin Varlığı, Klorür Korozyonu | 33 |
| 2.4 Donatı Korozyonunun Ölçüm ve Değerlendirme Yöntemleri | 36 |
| 2.5 Korozyona Karşı Alınacak Önlemler | 38 |
| 2.5.1 Puzolanlar..... | 40 |
| 2.6 Yüksek Fırın Cürufu | 44 |
| 2.6.1 Yüksek Fırın Cürufunun Bağlayıcı Madde Olarak Kullanılması..... | 46 |
| 2.6.2 Yüksek Fırın Cürufunun Puzolanik Aktivitesinin Araştırılması..... | 48 |
| 3. DENEYSEL ÇALIŞMA | 49 |
| 3.1 Üretimde Kullanılan Malzemeler | 49 |
| 3.2 Numune Üretimi | 51 |
| 3.3 Numunelerin Kürü ve Eskitme Süreci | 53 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 3.4 | Kontrol Deneyleri | 57 |
| 3.4.1 | Beton Numunelerde Yapılan Deneyler | 57 |
| 3.4.1.1 | Ağırlık ve Ultrases Ölçümü | 58 |
| 3.4.1.2 | Ağırlıkça ve Hacimce Su Emme Deneyleri | 58 |
| 3.4.1.3 | Basınçlı Su İşleme Deneyi | 59 |
| 3.4.1.4 | Basınç Deneyi..... | 59 |
| 3.4.1.5 | Yarma Deneyi..... | 60 |
| 3.4.1.6 | Karbonatlaşma Derinliğinin Ölçümü..... | 60 |
| 3.4.1.7 | Cl Konsantrasyonu Tayini Deneyi..... | 61 |
| 3.4.2 | Betonarme Numunelerde Yapılan Deneyler | 61 |
| 3.4.2.1 | Yarı-Hücre Potansiyeli Ölçümlü | 62 |
| 3.4.2.2 | Makro-Hücre Potansiyeli Ölçümü | 62 |
| 3.4.2.3 | Cl Konsantrasyonu Tayini Deneyi..... | 63 |
| 3.4.2.4 | Karbonatlaşma Derinliğinin Ölçümü | 64 |
| 3.4.2.5 | Çıkarılan Donatıların İncelenmesi..... | 64 |
| 4. | DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ..... | 65 |
| 4.1 | Fiziksel Özelliklerin Değerlendirilmesi | 65 |
| 4.1.1 | Birim Ağırlık ve Ses Geçiş Hızı | 65 |
| 4.1.2 | Su Emme Özelliği..... | 68 |
| 4.1.3 | Basınçlı Su İşleme Derinliği | 70 |
| 4.2 | Mekanik Özelliklerin Değerlendirilmesi | 72 |
| 4.2.1 | Basınç Dayanımı..... | 72 |
| 4.2.2 | Yarma Dayanımı..... | 74 |
| 4.2.3 | Elastisite Modülü | 77 |
| 4.3 | Korozyon Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi | 81 |
| 4.3.1 | Karbonatlaşma Derinliği | 81 |
| 4.3.2 | Cl Difüzyonu | 83 |
| 4.3.3 | Yarı-Hücre Potansiyeli..... | 88 |
| 4.3.4 | Makro-Hücre Potansiyeli | 92 |
| 4.3.5 | Donatılarda Korozyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi | 110 |
| 5. | DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ..... | 113 |
| 5.1 | Yarma Dayanımı..... | 113 |
| 5.2 | Yarı-Hücre Potansiyeli..... | 114 |
| 5.3 | Toplam Korozyon | 115 |
| 5.4 | Betonun Alkalinitesi | 116 |
| 5.4.1 | Alkaliniteye Yüksek Fırın Cürufunun Etkisi | 116 |
| 5.4.2 | Alkaliniteye Klorür Etkisi | 117 |
| 5.5 | Hacimce Su Emme | 118 |
| 5.6 | Korozyon Aktivitesinin Belirlenmesi | 119 |
| 6. | SONUÇ ve ÖNERİLER..... | 122 |
| | KAYNAKLAR..... | 124 |
| | EKLER | 135 |
| | ÖZGEÇMİŞ..... | 153 |

SİMGE LİSTESİ

| | |
|-----------------|---|
| α | Serbest ve toplam klorür için katsayı |
| α_A | Harcanan gümüş nitrat |
| α_B | Destile su için harcanan gümüş nitrat |
| α_f | Betonun çekme dayanımı için katsayı |
| Δ | Yoğunluk |
| ΔH | Su sütunu değerinde basınç farkı |
| γ | Özgül ağırlık |
| ε | Şekil değiştirme |
| ε_u | Kopma uzaması |
| ϕ | Çeliğin çapı |
| σ | Gerilme |
| μ | Poisson oranı |
| Ω | Ohm |
| μA | Mikro amper |
| A | Beton tabakası alanı |
| C_f | Toplam klorür |
| C_t | Serbest klorür |
| D | Difüzyon katsayısı |
| d | Beton numune çapı |
| d_c | Karbonatlaşma derinliği |
| d_{max} | Maksimum dane çapı |
| E_d | Dinamik elastisite modülü |
| E_m | Makro-hücre potansiyeli |
| E_s | Statik elastisite modülü |
| E_y | Yarı-hücre potansiyeli |
| f_c | Basınç dayanımı |
| f_{cts} | Yarmada çekme dayanımı |
| f_{su} | Çeliğin çekme dayanımı |
| f_{sy} | Çeliğin akma dayanımı |
| h_w | Basınçlı su işleme derinliği |
| i_j | j. gündeki akım |
| k | Permeabilite katsayısı |
| L | Beton tabakası kalınlığı |
| l | Beton numune boyu |
| N | Normalite |
| n | Elektrokimyasal olayda alınıp verilen elektron sayısı |
| P | Kırma kuvveti |
| q | Betondan geçen su miktarı |
| t | Zaman |
| TC_j | j. gündeki toplam korozyon |
| t_j | j. gündeki zaman |
| V | Volt |
| V | Ses geçiş hızı |
| W_k | Ağırlık kaybı oranı |
| W_{son} | Donatıların clark çözeltisi ile temizlendikten sonraki ağırlığı |
| W_{ilk} | Donatıların başlangıçtaki ağırlığı |

KISALTMA LİSTESİ

| | |
|---------|---------------------------------|
| CSH | Kalsiyum Silikat Hidrate |
| MSH | Magnezyum Silikat Hidrate |
| EDAX | Enerji Dispersive X Ray Analizi |
| SEM | Taramalı Elektron Mikroskopu |
| ACI | Amerikan Beton Enstitüsü |
| CSE | Bakır/Bakır Sülfat Elektrot |
| SCE | Standart Kalomel Elektrot |
| ASTM | Amerikan Malzeme Test Kuruluşu |
| TS | Türk Standardı |
| EN | Avrupa Normu |
| YFC | Yüksek Fırın Cürufu |
| DTA | Diferansiyel Termal Analiz |
| TG | Termo Gravimetri |
| CEB-FIB | Avrupa Beton Birliği |
| CSA | Kanada Standart Birliği |
| BS | İngiliz Standardı |

Copyright of Geowebtech, Inc. Http://www.geowebtech.com

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

| | | |
|------------|---|----|
| Şekil 2.1 | Betonda donatı korozyonu sırasının şematik gösterimi | 16 |
| Şekil 2.2 | Korozyon ürünlerinin hacimleri ve korozyon sonucu betonda görülen hasarlar | 17 |
| Şekil 2.3 | Klorür iyonlarının donatıda yol açtığı oyuklanma korozyonu | 19 |
| Şekil 2.4 | Betona sızan klorürlerin derinlik ile değişimi..... | 19 |
| Şekil 2.5 | Porozite ve permeabilite arasındaki farkın şematik gösterimi..... | 24 |
| Şekil 2.6 | Beton örtü tabakasında pH-zaman ilişkisi | 26 |
| Şekil 2.7 | Sabit olmayan durumda difüzyon | 36 |
| Şekil 3.1 | Agregalara ait granülometri eğrileri..... | 49 |
| Şekil 3.2 | Betonarme numuneler | 52 |
| Şekil 3.3 | Betonarme numunelerin ASTM G 109-92'ye göre şematik gösterimi ... | 53 |
| Şekil 3.4 | Taze betonlarda birim ağırlık ve hava boşluğu oranının YFC oranı ile değişimi | 57 |
| Şekil 3.5 | Beton numunelerde ses geçiş süresinin ölçümü..... | 58 |
| Şekil 3.6 | Basınçlı su işleme deney düzeneği..... | 59 |
| Şekil 3.7 | Yarma deney düzeneği | 60 |
| Şekil 3.8 | Beton numunelerde klorür tayini için toz numune alınan bölgeler..... | 61 |
| Şekil 3.9 | Yarı-hücre potansiyelinin ölçümü..... | 62 |
| Şekil 3.10 | Betonarme numunelerde elektropotansiyel ölçümü..... | 63 |
| Şekil 3.11 | Betonarme numunelerde klorür tayini için toz numune alınan bölgeler . | 63 |
| Şekil 4.1 | Beton numunelerde birim ağırlık-ses geçiş hızı ilişkisi | 66 |
| Şekil 4.2 | Beton numunelerde basınç dayanımı-ses geçiş hızı ilişkisi..... | 67 |
| Şekil 4.3 | Su ile çevrim uygulanan beton numunelerde % h_s -t ilişkisi | 68 |
| Şekil 4.4 | M1 çözeltili ile çevrim uygulanan beton numunelerde % h_s -t ilişkisi | 69 |
| Şekil 4.5 | M4 çözeltili ile çevrim uygulanan beton numunelerde % h_s -t ilişkisi | 69 |
| Şekil 4.6 | Su ile çevrim uygulanan beton numunelerde h_w -t ilişkisi | 71 |
| Şekil 4.7 | M1 çözeltili ile çevrim uygulanan beton numunelerde h_w -t ilişkisi | 71 |
| Şekil 4.8 | M4 çözeltili ile çevrim uygulanan beton numunelerde h_w -t ilişkisi | 71 |
| Şekil 4.9 | Su ile çevrim uygulanan beton numunelerde f_c -t ilişkisi..... | 73 |
| Şekil 4.10 | M1 çözeltili ile çevrim uygulanan beton numunelerde f_c -t ilişkisi..... | 73 |
| Şekil 4.11 | M4 çözeltili ile çevrim uygulanan beton numunelerde f_c -t ilişkisi..... | 73 |
| Şekil 4.12 | Su ile çevrim uygulanan beton numunelerde f_{cts} -t ilişkisi | 74 |
| Şekil 4.13 | M1 çözeltili ile çevrim uygulanan beton numunelerde f_{cts} -t ilişkisi | 75 |
| Şekil 4.14 | M4 çözeltili ile çevrim uygulanan beton numunelerde f_{cts} -t ilişkisi | 75 |
| Şekil 4.15 | Elastisite modülü-basınç dayanımı ilişkisi | 80 |
| Şekil 4.16 | Modül oranı (E_{s3}/E_d)- basınç dayanımı ilişkisi | 80 |
| Şekil 4.17 | Su ile çevrim uygulanan beton numunelerde d_c -t ilişkisi | 82 |
| Şekil 4.18 | M1 çözeltili ile çevrim uygulanan beton numunelerde d_c -t ilişkisi..... | 82 |
| Şekil 4.19 | M4 çözeltili ile çevrim uygulanan beton numunelerde d_c -t ilişkisi..... | 82 |
| Şekil 4.20 | Betonarme numunelerde d_c -YFC oranı ilişkisi | 83 |
| Şekil 4.21 | M1 çözeltili ile çevrim uygulanan beton numunelerde Cl konsantrasyonu-t ilişkisi (0-10mm)..... | 84 |
| Şekil 4.22 | M4 çözeltili ile çevrim uygulanan beton numunelerde Cl konsantrasyonu-t ilişkisi (0-10mm)..... | 84 |
| Şekil 4.23 | Beton numunelerde 364 gün sonunda Cl konsantrasyonunun derinlik ile değişimi | 85 |
| Şekil 4.24 | Beton numunelerde 364 gün sonunda farklı derinlikteki Cl konsantrasyonunun YFC oranı ile değişimi | 85 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Şekil 4.25 | M1 çözültisi ile 15 çevrim uygulanan betonarme numunelerde Cl konsantrasyonu-derinlik ilişkisi | 86 |
| Şekil 4.26 | M4 çözültisi ile 15 çevrim uygulanan betonarme numunelerde Cl konsantrasyonu-derinlik ilişkisi | 87 |
| Şekil 4.27 | Su ile çevrim uygulanan YFC katkısız betonarme numunelerde yarı hücre potansiyeli-zaman ilişkisi | 88 |
| Şekil 4.28 | M1 çözültisi ile çevrim uygulanan YFC katkısız betonarme numunelerde yarı hücre potansiyeli-zaman ilişkisi | 89 |
| Şekil 4.29 | M4 çözültisi ile çevrim uygulanan YFC katkısız betonarme numunelerde yarı hücre potansiyeli-zaman ilişkisi | 89 |
| Şekil 4.30 | Su ile çevrim uygulanan %30 YFC katkılı betonarme numunelerde yarı hücre potansiyeli-zaman ilişkisi | 90 |
| Şekil 4.31 | M1 çözültisi ile çevrim uygulanan %30 YFC katkılı betonarme numunelerde yarı hücre potansiyeli-zaman ilişkisi | 90 |
| Şekil 4.32 | M4 çözültisi ile çevrim uygulanan %30 YFC katkılı betonarme numunelerde yarı hücre potansiyeli-zaman ilişkisi | 90 |
| Şekil 4.33 | Su ile çevrim uygulanan %60 YFC katkılı betonarme numunelerde yarı hücre potansiyeli-zaman ilişkisi | 91 |
| Şekil 4.34 | M1 çözültisi ile çevrim uygulanan %60 YFC katkılı betonarme numunelerde yarı hücre potansiyeli-zaman ilişkisi | 91 |
| Şekil 4.35 | M4 çözültisi ile çevrim uygulanan %60 YFC katkılı betonarme numunelerde yarı hücre potansiyeli-zaman ilişkisi | 92 |
| Şekil 4.36 | Su ile çevrim uygulanan betonarme numunelerde akım-zaman ilişkisi.. | 93 |
| Şekil 4.37 | M1 çözültisi ile çevrim uygulanan betonarme numunelerde akım-zaman ilişkisi | 94 |
| Şekil 4.38 | M4 çözültisi ile çevrim uygulanan betonarme numunelerde akım-zaman ilişkisi | 95 |
| Şekil 4.39 | Su ile çevrim uygulanan YFC katkısız hasarlı betonarme numunelerde i-t ilişkisi..... | 96 |
| Şekil 4.40 | M1 çözültisi ile çevrim uygulanan YFC katkısız hasarlı betonarme numunelerde i-t ilişkisi | 97 |
| Şekil 4.41 | M4 çözültisi ile çevrim uygulanan YFC katkısız hasarlı betonarme numunelerde i-t ilişkisi | 98 |
| Şekil 4.42 | Su ile çevrim uygulanan %30 YFC katkılı hasarlı betonarme numunelerde i-t ilişkisi..... | 99 |
| Şekil 4.43 | M1 çözültisi ile çevrim uygulanan %30 YFC katkılı hasarlı betonarme numunelerde i-t ilişkisi | 101 |
| Şekil 4.44 | M4 çözültisi ile çevrim uygulanan %30 YFC katkılı hasarlı betonarme numunelerde i-t ilişkisi | 102 |
| Şekil 4.45 | Su ile çevrim uygulanan %60 YFC katkılı hasarlı betonarme numunelerde i-t ilişkisi..... | 103 |
| Şekil 4.46 | M1 çözültisi ile çevrim uygulanan %60 YFC katkılı hasarlı betonarme numunelerde i-t ilişkisi | 104 |
| Şekil 4.47 | M4 çözültisi ile çevrim uygulanan %60 YFC katkılı hasarlı betonarme numunelerde i-t ilişkisi | 106 |
| Şekil 4.48 | Su ile çevrim uygulanan betonarme numunelerde toplam korozyon-zaman ilişkisi | 107 |
| Şekil 4.49 | M1 çözültisi ile çevrim uygulanan betonarme numunelerde toplam korozyon-zaman ilişkisi | 108 |
| Şekil 4.50 | M4 çözültisi ile çevrim uygulanan betonarme numunelerde toplam korozyon-zaman ilişkisi | 109 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Şekil 4.51 | Korozyon oluşan bölge boyunun YFC oranı ile değişimi | 111 |
| Şekil 4.52 | Korozyon oluşan donatılarda ağırlık kaybının YFC oranı ile değişimi .. | 112 |
| Şekil 5.1 | α_f katsayısının cüruf oranı ve çözeltili konsantrasyonu ile değişimi | 113 |
| Şekil 5.2 | Korozyon bölgelerinde kalma sayıları..... | 115 |
| Şekil 5.3 | Hasarlı betonarme numunelerde 60. haftadaki toplam korozyon değerleri | 115 |
| Şekil Ek 1 | Permeabilite deneyi | 147 |
| Şekil Ek 1a | Permeabilite deneyinin genel görünüşü | 147 |
| Şekil Ek 1b | Permeabilite numunesinin detay görüntüsü..... | 147 |
| Şekil Ek 1c | Su işleme derinliği..... | 147 |
| Şekil Ek 2 | Basınç deneyi..... | 148 |
| Şekil Ek 2a | Basınç deneyinin genel görünüşü | 148 |
| Şekil Ek 2b | Basınç numunesinin detay görüntüsü..... | 148 |
| Şekil Ek 3 | Yarma deneyi..... | 148 |
| Şekil Ek 3a | Yarma deneyinin genel görünüşü..... | 148 |
| Şekil Ek 3b | Yarma numunesinin detay görüntüsü..... | 148 |
| Şekil Ek 3c | Yarma numunesi | 148 |
| Şekil Ek 4 | Karbonatlaşma derinliğinin belirlenmesi | 149 |
| Şekil Ek 5 | Beton numunelerden toz çıkarılması..... | 149 |
| Şekil Ek 6 | Toz numunelerde klorür konsantrasyonunun belirlenmesi | 150 |
| Şekil Ek 7 | Betonarme numuneler ve potansiyel ölçümleri | 151 |
| Şekil Ek 7a | Betonarme numunelerin genel görünüşü..... | 151 |
| Şekil Ek 7b | Betonarme numunelerin detay görüntüsü | 151 |
| Şekil Ek 7c | Betonarme numunelerde yarı-hücre potansiyeli ölçümü | 151 |
| Şekil Ek 7d | Betonarme numunelerde makro-hücre potansiyeli ölçümü | 151 |
| Şekil Ek 8 | Betonarme numunelerden toz çıkarılması..... | 151 |
| Şekil Ek 9 | YFC oranının ve Cl^- iyon konsantrasyonunun etkisi | 152 |

ÇİZELGE LİSTESİ

| | Sayfa |
|---------------|--|
| Çizelge 2.1 | Betonun klorür içeriğinin ACI 222R-01'e göre sınırlandırılması..... 34 |
| Çizelge 2.2 | Betondaki klorür içeriğinin TS EN206-1'e göre sınırlandırılması 34 |
| Çizelge 2.3 | ASTM C 876 ve ACI 222R-01'e göre yarı-hücre potansiyel kriterleri 37 |
| Çizelge 2.4 | Harç üretimi (1 dm ³) için gerekli malzeme miktarları 44 |
| Çizelge 2.5 | Yüksek fırın cüruflarının kimyasal bileşimi 45 |
| Çizelge 3.1 | Üretimde kullanılan agregaların fiziksel özellikleri..... 49 |
| Çizelge 3.2 | Çimento ve yüksek fırın cürufunun kimyasal, fiziksel ve mekanik deney sonuçları 50 |
| Çizelge 3.3 | Katkı maddesinin özellikleri 51 |
| Çizelge 3.4 | Donatının mekanik özellikleri..... 51 |
| Çizelge 3.5 | MgCl ₂ tuzunun özellikleri..... 51 |
| Çizelge 3.6 | 1 m ³ taze beton için gerekli olan gerçek malzeme miktarları..... 52 |
| Çizelge 3.7 | Numune kodlarının açıklamaları..... 55 |
| Çizelge 3.8 | Deney programı..... 56 |
| Çizelge 5.1 | Korozyon aktivite değerlendirme sistemi 117 |
| Çizelge 5.2 | Deney sonuçlarının korozyon aktivite seviyesi bakımından değerlendirilmesi 119 |
| Çizelge Ek 1 | YFC katkısız betonların deney sonuçları..... 136 |
| Çizelge Ek 2 | %30 YFC katkılı betonların deney sonuçları..... 137 |
| Çizelge Ek 3 | %60 YFC katkılı betonların deney sonuçları..... 138 |
| Çizelge Ek 4 | YFC katkısız betonların bağıntılardan hesaplanmış elastisite modülü değerleri..... 139 |
| Çizelge Ek 5 | %30 YFC katkılı betonların bağıntılardan hesaplanmış elastisite modülü değerleri 140 |
| Çizelge Ek 6 | %60 YFC katkılı betonların bağıntılardan hesaplanmış elastisite modülü değerleri 141 |
| Çizelge Ek 7 | YFC katkılı ve katkısız betonarme numunelerin deney sonuçları 142 |
| Çizelge Ek 8 | Birim ağırlık (Δ , kg/m ³)-ses geçiş hızı (V, km/sn) bağıntıları..... 143 |
| Çizelge Ek 9 | Basınç dayanımı (f _c , MPa)-ses geçiş hızı (V, km/sn) bağıntıları..... 143 |
| Çizelge Ek 10 | Hacimce su emme (h _s , %)-zaman (t, gün) bağıntıları 143 |
| Çizelge Ek 11 | Basınçlı su işleme derinliği (h _w , mm)-zaman (t, gün) bağıntıları 143 |
| Çizelge Ek 12 | Basınç dayanımı (f _c , MPa)-zaman (t, gün) bağıntıları 144 |
| Çizelge Ek 13 | Yarma dayanımı (f _{cts} , MPa)-zaman (t, gün) bağıntıları..... 144 |
| Çizelge Ek 14 | Elastisite modülü (E, GPa)- basınç dayanımı(f _c , MPa) bağıntıları 144 |
| Çizelge Ek 15 | Modül oranı (E _{s3} /E _d)-zaman (t, gün) bağıntıları..... 144 |
| Çizelge Ek 16 | Karbonatlaşma derinliği (d _c , mm)-zaman (t, gün) bağıntıları (Beton). 145 |
| Çizelge Ek 17 | Karbonatlaşma derinliği (d _c ,mm)-YFC oranı bağıntıları (Betonarme) 145 |
| Çizelge Ek 18 | Klorür konsantrasyonu (Cl ⁻ , mg/l)-zaman (t, gün) bağıntıları (Beton) 145 |
| Çizelge Ek 19 | Klorür konsantrasyonu (Cl ⁻ , mg/l)-derinlik (d, mm) bağıntıları (Betonarme)..... 145 |
| Çizelge Ek 20 | Klorür konsantrasyonu (Cl ⁻ , mg/l)-derinlik (d, mm) bağıntıları (Beton). 146 |
| Çizelge Ek 21 | Klorür konsantrasyonu (Cl ⁻ , mg/l)-derinlik (d, mm) bağıntıları (Beton). 146 |

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın meydana gelmesinde, değerli zamanını ayırarak çalışmanın yürütücülüğünü üstlenen, her zaman olduğu gibi çalışma süresince de değerli bilgi ve bilimsel tecrübelerinden yararlanma imkânı bulduğum Hocam Sayın Prof. Dr. Fevziye AKÖZ'e,

Çalışma sırasında konu ile ilgili bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım Sayın Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR'e, Prof. Dr. Turan ÖZTURAN'a ve Prof. Dr. Ali Fuat ÇAKIR'a,

Bazı deneylerin gerçekleşmesinde Kültür Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri Laboratuvarı imkânlarından yararlanmamı sağlayan Sayın Yard. Doç. Dr. Hasan BİRİCİK'e,

Deney aşamasında yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Nabi YÜZER'e ve YTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarı çalışanlarına,

Deneysel çalışmada kullanılan çimento ve yüksek fırın cürufunu temin eden AkçanSA Çimento Fabrikasına, yüksek fırın cürufunun öğütülmesini sağlayan Lafarge Aslan Çimento Fabrikasına ve akışkanlaştırıcı katkı maddesini temin eden SİKA Yapı Kimyasalları A.Ş'ye,

Doktora tezimin hazırlanması sırasında gösterdiği sabır ve emek için eşim Pınar ÇAKIR'a,

Destegini her zaman hissettiğim aileme, sonsuz teşekkür ederim.

Özgür ÇAKIR

Ocak, 2006

ÖZET

Farklı özellikteki beton ile üretilen ve farklı ortam koşullarına maruz kalan betonarme elemanlarda yapılacak ölçüm ve deneylerden yararlanılarak, akım şiddetinin ve toplam korozyonun belirlenmesi, bunların kritik değerler ile karşılaştırılması ve elemanın korozyon durumunun tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla planlanan çalışmanın deneysel bölümünde, kalker esaslı kırmataş agregası, silis esaslı kum, %0 (katkısız), %30 ve %60 oranlarında öğütülmüş yüksek fırın cürufu katılarak, su/bağlayıcı oranı 0.49, katkı maddesi oranı %0.5 olan malzemeler ile akıcı kıvamda beton hazırlanmıştır. Taze beton özellikleri belirlenen bu beton ile 192 adet 100/200 mm boyutlu silindir, 96 adet 150 mm küp ve 18 adet 279.4x152.4x114.3 mm boyutlu prizma betonarme numune üretilmiştir. Beton numuneler, kalıptan çıkarıldıktan sonra 28 gün standart koşullarda, 28. günden sonra ıslanma-kuruma çevrimi için 14 gün klorür konsantrasyonu 0 (su), 10000 ve 40000 mg/l olan magnezyum klorür çözeltisinde, 14 gün de laboratuvar ortamında bekletilmiş, her seriye 0 (kontrol), 1, 3, 6, 9 ve 12 çevrim uygulanmıştır. Betonarme numuneler, 28. güne kadar ıslak bez içinde tutulduktan sonra her birinin üzerine polystren havuzcuklar yerleştirilmiştir, ıslanma-kuruma eskitme süreci 14 gün ara ile havuzcuklara su ve çözelti doldurulup boşaltılarak 1, 3, 6, 9 12 ve 15 ıslanma-kuruma çevrimi uygulanmıştır. Silindir numunelerde basınç ve yarma, küp numunelerde permeabilite deneyleri, prizma numunelerde yarı-hücre ve makro-hücre potansiyel ölçümleri yapılmıştır. Numunelerde aynı çevrimlerin sonunda birim hacim ağırlık, ses geçiş hızı, su emme oranları, karbonatlaşma derinliği ve farklı derinliklerinde serbest klorür konsantrasyonu belirlenmiştir.

Deney sonuçlarından, ıslanma-kuruma eskitme sürecine maruz bırakılmasına rağmen cüruf katkılı ve katkısız betonların basınç ve yarma dayanımı zamanla artmıştır. Beton üretiminde yüksek fırın cürufu kullanılması ve oranının artırılmasının betonun performansına olumlu etki yaptığı görülmüştür. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu katılması betonun geçirimsizliğini, klorür iyonlarının beton içinde ilerlemesini; klorür iyonu difüzyonunu, anot-katot arasındaki akımı (μA) ve toplam korozyonu (coulomb) dolayısı ile donatı korozyonunu azaltmıştır. Yüksek fırın cürufu, puzolanik etkisi nedeni ile karbonatlaşma derinliğini arttırmış, alkaliniteyi düşürmüştür, buna rağmen, hasarlı betonarme numunelerde bile korozyon etkisini azaltmıştır. Deney sonuçlarından geliştirilen bağıntılardan yararlanılarak betonarme elemanlarda yapılacak ölçüm ve deneylerin birlikte değerlendirilmesinden donatılardaki 100 Ω 'luk dirençten geçen akımın tahmin edilebileceği ve kritik akım değeri ile karşılaştırılabileceği kanısına varılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Akım, donatı korozyonu, kalıcılık, ıslanma-kuruma çevrimi, magnezyum klorür, makro-hücre potansiyeli, öğütülmüş yüksek fırın cürufu, yarı-hücre potansiyeli.

ABSTRACT

This work aims to estimate the corrosion activity by determining the current and total corrosion with measurements and experiments carried out on reinforced concrete specimens which are produced with different mix design and exposed to different environmental conditions. In the experimental part of the study, fluid consistency concrete is produced with limestone based crushed stone, silica based sand and ground granulated blast furnace slag; 0% (no additive), 30% and 60%, having water/binder ratio of 0.49 and 0.5% additive. 192 cylindrical concrete samples having dimensions of 100/200 mm, 150 cubic concrete samples having dimensions of 150 mm, and 18 prismatic reinforced concrete samples having dimensions of 279.4x152.4x114.4 mm are produced by using the concrete whose fresh concrete properties are determined. After remolding the concrete samples, they are stored for 28 days in standard conditions, and at the end of 28 days, the samples are exposed to magnesium chloride solution with chloride concentrations of 0 (water), 10000 and 40000 mg/l for 14 days, and then in the laboratory conditions for another 14 days, and each series is exposed to 0 (control), 1, 3, 6, 9, and 12 cycles. Reinforced concrete samples are kept in wet burlap for 28 days and then polystyrene ponds are installed on each samples, water and solutions containing chlorides are filled and emptied for 14 days period, and wetting-drying cycles are applied during 1, 3, 6, 9, 12, and 15 cycles. The cylindrical samples were subjected to compressive and tensile splitting tests, cubic samples were subjected to water permeability tests while half-cell potential and macro-cell potential on prismatic samples are measured. Also density, ultrasonic pulse velocity, water absorption ratios, carbonation depth and free chloride concentrations at different depths are determined.

According to the test results, the compressive and flexural strength of concretes with and without ground granulated blast furnace slag increase by time although they are exposed to wetting-drying cycle. Utilization and increasing the amount of ground granulated blast furnace slag in concrete production make affirmative effect on concrete performance. Reinforced corrosion decreases by decreasing the permeability of concrete, transfer of chloride ions into concrete; diffusivity of chloride ions, current flowing (μA) between anode-cathode, and total corrosion (Coulomb). Although carbonation depth increases and alkalinity decreases due to the pozzolanic property of ground granulated blast furnace slag, corrosion of damaged reinforced concrete specimens decreases. It is convicted that the estimation of current flowing on $100\ \Omega$ resistance and comparing with critical current value is possible with measurements and experiments that are carried out on reinforced concrete specimens and equations developed by using the experimental results.

Keywords: Current, reinforced corrosion, durability, wetting-drying cycle, magnesium chloride, macro-cell potential, ground granulated blast furnace slag, half-cell potential.

1. GİRİŞ

Beton ve betonarme, yapı teknolojisinde yaygın olarak kullanılan ana yapı malzemesidir. Beton, fiyatının düşük, bileşimindeki malzemelerin kolay elde edilebilir ve kolay şekillendirilebilir olması nedeni ile yapı üretiminde diğer yapı malzemelerinden daha çok tercih edilmekte ve ekonomik önem taşımaktadır. Beton ile ilgili araştırmalar genellikle daha yüksek dayanımlı beton üretiminde yoğunlaşmaktadır. Araştırmalarda ve uygulamada esas olarak çimento özellikleri geliştirilerek yüksek dayanımlı betonlar üretilmekte, ancak betonun kalıcılığı göz ardı edilmektedir. Tasarımcılar tarafından dış ortam koşulları ve betonun kalıcılığı dikkate alınmadığı için, hasar görmüş yapıların onarım ve rehabilitasyonunda ciddi oranda kaynak kaybı olmaktadır. Dünyanın farklı bölgelerinden betonun durabilitesi ile ilgili çok sayıda problem rapor edildiği için, bu hasarların tespiti, uygun ölçüm yöntemlerinin geliştirilmesi ile ilgili yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Bu araştırmalarda, kalıcı bir beton üretmek temel amaç olmuştur. Yer aldığı yapının çevresel koşullarında, bozulma ve hasarlardan kaynaklanan ilave bakım ve onarım maliyeti gerektirmeden istenilen servis ömrünü sağlayan betonun **kalıcı** olduğu kabul edilir (Mather, 2004).

Ülkemizde, 17 Ağustos Depremi'nin ardından, farklı Üniversitelerin İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemesi öğretim üyeleri tarafından yayımlanan inşaat mühendisliği ve yapı sektörü açısından son derece önem taşıyan 'Beton Kalite Deklarasyonu'nda, geçirimli beton ile üretilmiş taşıyıcı betonarme elemanlarındaki donatının korozyona uğraması sonucu donatı ile betonun birlikte çalışmasını sona erdiği, bunun da depremlerde betonarme yapılar için önemli bir zaaf oluşturduğu belirtilmiş; betonun, yapının projesinde öngörülen sınıfı sağlasa ve yeterli miktarda donatı doğru olarak yerleştirilmiş olsa bile donatı-beton aderansının korozyon nedeniyle zayıflaması durumunda taşıma gücünün önemli ölçüde azaldığı ifade edilmiştir.

Korozyonun mühendislik ve ekonomik alanlarda önemi 20. yüzyılda metal kullanımının büyük boyutlara erişmesi ile çok çarpıcı hale gelmiş, korozyonun tarihi belki metalin tarihi kadar eski olmasına rağmen korozyonun neden ve nasıl meydana geldiğinin anlaşılması 20. asrın son yarısında mümkün olmuştur. Bilindiği gibi ilk metal üretiminin 8-9 bin yıl önce Anadolu'da yapıldığı, bu metalin bakır olduğu ve daha sonra bunu demirin takip ettiği iddia edilmektedir. Başka bir deyişle metalik korozyon ilk kez 8-9 bin yıl önce Anadolu'da, metallerin insanoğlu tarafından üretilmesi ile başlamıştır. Yapılan çalışmalar, dünyadaki metalik korozyon kayıplarının her yıl ülkelere Gayri Safi Milli Hasıllarının %3.5-%5'i arasında bir yük yüklediğini göstermektedir; bu kayıp, Türkiye için %4.5 civarındadır. Bilim

ve teknolojinin sağladığı olanaklardan ekonomik ve doğru olarak yararlanılması halinde bazı alanlarda bu kayıpların %40'a kadar azaltılabileceği de bilinmektedir (Çakır, 2000).

Betonarmenin kalıcılığında donatının korozyonu önemli bir yer tutar. Beton içine çelik donatı yerleştirilmesine ilk kez 1850 yılında başlanmasına karşılık beton içindeki donatının korozyonu son 15-20 yılda tüm dünyada çok önem kazanmış, donatıların korozyonu, korozyonun önlenmesi ve kontrolü ile ilgili çalışmalar önemli oranlara ulaşmıştır. Bilindiği üzere köprüler, limanlar, deniz içinde veya deniz kenarında olan yapılar, kısacası çelik donatılı ve klorür etkisine maruz ıslak ve rutubetli ortamda kullanılan beton yapılar korozyon açısından hayati tehlikelere maruz kalmaktadır. Ülkemizin üç tarafı denizlerle çevrilidir ve gerek deniz içi gerekse denize yakın bölgelerde her tür inşaat yapımı büyük bir hızla artmaktadır. Dolayısı ile tuzlu su ve tuzlu su ile kirlenmiş rutubetli atmosfere maruz donatılı betonlarda donatı korozyonu yakın gelecekte daha ciddi bir sorun olarak karşımıza çıkacaktır. Örneğin, Birleşik Devletlerde, karayolu yapılarının donatı korozyonu kaynaklı onarım ve rehabilitasyonu için 20 Milyar \$, İngiltere'de sadece yol köprüleri için 600 Milyon £'ün üzerinde para gerektiği ifade edilmektedir (Almusallam, 2001).

Donatı korozyonunun araştırılmasında arazide veya laboratuarda uygulanan farklı tespit, ölçüm ve deney yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Arazide yapılan deneylerde, yapı elemanının kendisi, bir başka deyişle prototipi deney numunesi olur, korozyon hasarı, gözlem, potansiyel ölçümü veya paslanma derinliği ölçülerek değerlendirilir veya uzaktan sürekli ölçümler yapılarak korozyon başlangıç ve gelişimi hakkında veri elde edilir. Laboratuvar çalışmalarında ise, potansiyel ve akım şiddeti tayin edilir. Korozyon kontrolü için, özellikle duyarlı noktalarda korozyon hızının sürekli ölçülerek kaydedilmesi gerekir. Bu amaçla kullanılan cihaz ve donanımlar çoğunlukla doğrusal korozyon kinetiği olarak adlandırılan yaklaşım üzerine kuruludur. Geleneksel elektrokimyasal tekniklere uygun olan bu donanımların tümünde korozyona uğrayan metale dışarıdan akım uygulanması gerekir. Dışarıdan akım uygulanması, doğal korozyon potansiyelinden sapma gibi önemli bir sakıncayı da beraberinde getirmektedir (Doruk, 1996).

Yapılan kaynak taramasında, beton üretiminde öğütülmüş yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı gibi puzolanik özelliğe sahip mineral katkıları kullanıldığında, bu malzemelerin çimento hamurunda daha ince ve süreksiz boşluk oluşturduğu, agrega-çimento arayüzündeki boşlukları da azalttığı, betonun dayanıklılığını arttırdığı, donatının klorüre bağlı korozyonunun önlenmesinde ve/veya azaltılmasında etkili olduğu ifade edilmektedir. Bu nedenle donatı korozyonu ile ilgili çalışmalarda bu maddelerin etkisi etraflıca araştırılmaktadır. Endüstri atığı olan bu mineral katılardan yüksek fırın cürufu, yüksek

oranda klor bağlama ve zayıf bağlayıcılık özelliğine sahiptir. Miktarının çok fazla, depolanmasının zor olması nedeni ile yüksek fırın cürufunun beton teknolojisinde kullanılması ekonomik sürdürülebilirlik ve çevre sorunlarına çözüm olması bakımından özel önem taşımaktadır. Bu olumlu özelliği nedeni ile çimentodan daha ince öğütülmesinin zor ve maliyetinin yüksek olmasına rağmen, bu çalışmada mineral katkı olarak yüksek fırın cürufu seçilmiştir.

Farklı oranlarda yüksek fırın cürufu katılarak hazırlanan beton ile üretilen ve farklı konsantrasyonlardaki magnezyum klorür çözeltileri ile ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan betonarme numunelerde yapılan deney ve ölçümlerden yararlanılarak akım şiddeti ve toplam korozyonun belirlenmesine olanak sağlayacak bağıntılar elde edilmesi, sahada yapılacak ölçüm ve yapıdan alınacak numunelerde yapılacak ölçüm ve deneylerin bu bağıntılar ile birlikte değerlendirilmesinden yapıdaki korozyon durumunu tahmin edilmesi amaçlanmıştır.

Bu amaçla planlanan deneysel çalışmada, yüksek fırın cürufunun beton özelliklerine etkisi, uzun süreli kalıcılık deneyleri ile araştırılmış, aynı özellikteki beton ile betonarme numuneler hazırlanmış, donatıların korozyonunu kontrol için, gerçeği daha iyi yansıtmak amacı ile doğal korozyon potansiyelinin belirlenmesini esas alan deney yöntemlerinden yararlanılarak korozyon potansiyeli ölçülmüş, $100 \Omega \cdot \text{cm}^2$ dirençten geçen akım şiddeti hesaplanmış, potansiyelin ve akım şiddetinin zamana bağlı değişimi incelenmiştir.

Çalışmanın amacının ve kapsamının verildiği giriş bölümünden sonra gelen ikinci bölümünde, kaynak taramasından yararlanılarak beton ve betonarmenin kalıcılığı, kalıcılığa etki eden faktörlerden aşınma, donma-çözünme, alkali-agrega reaksiyonu ve suyun betonun kalıcılığına etkileri açıklanmış, donatının korozyonu, donatı korozyonuna etki eden faktörler, donatı korozyonunun ölçüm ve değerlendirme yöntemleri verilmiş, korozyona karşı alınacak önlemler detaylı olarak ele alınmış; bu kapsamda puzolanlar genel olarak, çalışmanın konusu olan yüksek fırın cürufu etrafınca açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde donatıyı saran betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine yüksek fırın cürufu oranının, farklı konsantrasyonlardaki su ve klorür çözeltileri ile uygulanan ıslanma-kurumanın etkileri uzun süreli deneyler ile araştırılmıştır. Bu amaçla planlanan deneysel çalışmada, çimento ile yer değiştirmeli (ikameli) olarak yüksek fırın cürufu katılmış beton ile beton ve betonarme numuneler üretilmiş, bu numuneler su ve farklı konsantrasyonlardaki çözeltiler ile her bir çevrim 28 gün süren ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılmıştır. Beton ve betonarme numunelerde belirli tekrarlardan sonra fiziksel ve mekanik deneyler yapılmış, betonarme numunelerdeki korozyon süreci, 420 gün süren yarı-hücre ve makro-hücre potansiyeli

ölçümleri ile izlenmiştir. Dördüncü bölümde, deneylerden alınan sonuçlar, ıslanma-kurumanın betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkileri zamana ve cüruf oranına göre değerlendirilmiş, değişkenler arasında istatistiksel ilişkiler araştırılmıştır.

Beşinci bölümde, donatı korozyonunun izlenmesinde kullanılan deney yöntemlerinden ve beton ve betonarmedeki dürabilite deney sonuçlarından yararlanılarak betonun yaşına, örtü betonunun kalınlığına, kullanılan yüksek fırın cürufu oranına, betonun görünen (zahiri) porozitesini temsilen hacimce su emmesine ve betona dışarıdan etki eden çözeltinin klorür konsantrasyonuna bağlı olarak beton içine nüfuz eden serbest klorürün konsantrasyonunun, belirlenmesine olanak sağlayacak bir bağıntı elde edilmiştir. Deney sonuçlarından yararlanılarak, serbest klorür ile makro-hücre potansiyel ölçümlerinden elde edilen, bir başka deyişle serbest klorürün neden olacağı akımın (i , μA) belirlenmesine ve akımın kritik değeri ile karşılaştırılmasına olanak sağlayacak ikinci bir bağıntı elde edilmiştir. Deney sonuçlarından yararlanılarak ayrıca sistemde yarı-hücre potansiyelinin ölçülmesi daha pratik olduğundan, yarı-hücre potansiyeli ile makro-hücre potansiyeli arasında ilişki araştırılmış, bu iki potansiyel arasında lineer bir bağıntı elde edilmiştir. Bu bağıntıdan belirlenecek makro-hücre potansiyelinden hesaplanacak akımın (i , μA), sistem için kritik değer olan $10\mu A$ 'lık sınır değer ile karşılaştırılmasından sistemin korozyon durumu belirlenebilecektir. Bağıntılar bir uygulama ile test edilmiş; cürüflü çimento kullanılarak veya çimentoya cüruf katılarak üretilmiş beton ile inşa edilmiş yapının yaşı, kullanılan betondaki cüruf oranı ve dış ortamın klorür konsantrasyonu biliniyor ise yapıda örtü betonu kalınlığının ölçülmesi ve alınacak beton örneklerinde hacimce su emmenin belirlenmesi ile betondaki serbest klorür konsantrasyonunun ve akım değerinin tahmin edilebileceği ve yapının korozyon bakımından durumunun kestirilebileceği ya da yarı-hücre potansiyeli ölçülerek yapının korozyon durumunun belirlenebileceği kanaatine varılmıştır. Altıncı ve son bölümde, çalışmadan alınan sonuçlar verilmiş ve ileriki çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

2. KONU İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER

Beton ve betonarme elemanların zamanla bozulmasına içten veya dıştan etki eden fiziksel, kimyasal, biyolojik veya mekanik etkenler neden olur (Baradan vd., 2002; Memon vd., 2002). Beton veya betonarme elemanlar, birkaç etkinin bir arada veya peş peşe etkimesi sonucu beklenenden daha kısa sürelerde bozulabilir (Baradan vd., 2002). Betonun hizmet gördüğü süre boyunca karşılaştığı kimyasal ve fiziksel olaylar karşısında yeterli direnci gösterebilmesi, yeterince dayanıklı olması, betonun dayanımı kadar önemlidir (Erdoğan, 2003). Özellikle deniz atmosferine veya suyuna maruz yapılarda ve endüstri yapılarında kalıcılık, en önemli sorunlardan biridir (Akman, 1992).

2.1 Kalıcılık

Yapı, yapı elemanı ve yapı malzemelerinin işlevlerini uzun vadede bozulmadan yerine getirebilme özelliği dayanıklılık, kalıcılık veya dürabilite olarak tanımlanır (Neville,1990; Akman, 1992; Baradan vd., 2002; Colleparadi ve Gököz, 1989). Evrende canlı veya cansız hiçbir varlık mükemmel dayanıklı değildir; doğal olarak malzemeler de bu kurala uyarlar (Akman, 1989). Yapıların inşası çok zor ve pahalı olduğu için, yapı sahipleri, yapı için uzun bir servis ömrü talep ederler. Örneğin, bundan 50 yıl önce, geleneksel bir betonarme yapı için, 25 yıllık bir servis ömrü çok makul bir istek iken, bugün birçok yapı 100 yıllık bir servis ömrü için tasarlanmakta, bu nedenle dayanıklılık gittikçe artan bir önem kazanmaktadır (Shah vd., 2003). Yapıların kalıcı olabilmesi, ulusal ekonomiler için hayati önem taşımaktadır (Memon vd., 2002). Betonarme yapıların, kısa sürede işlevselliğini yitirmesi sadece ekonomik ve teknik bir problem değil, doğal kaynakların verimsiz kullanımı anlamına gelmektedir. Dünyada maliyet ve kaynak kullanımı açısından çok büyük paya sahip olan inşaat sektöründe doğal kaynakların verimsiz kullanımı, çevresel ve ekolojik problemlere yol açar. Bu durum, sektörde sürdürülebilir bir gelişmenin sağlanması için yapılarda kalıcılığın önemini açıkça göstermektedir (Baradan vd, 2002; Arıoğlu, 1989).

2.1.1 Beton ve Betonarmenin Kalıcılığı

Beton, taneli mineral malzeme olan agreganın, bunları yapıştıran çimento ve su ile karıştırılması sonucu meydana gelen ve önceden şekil verilebilen yapay taş olarak tanımlanabilir (Akman, 1987). Beton, çağdaş toplumlarda yapı üretiminin temelini oluşturan ve yaygın olarak kullanılan en önemli (Özkul vd., 1999; Maslehuddin, 2003; Akman, 1987) taşıyıcı yapı malzemesidir (Arıoğlu, 1989; Akman, 1987). Günümüzde, dünyada her yıl

yaklaşık 5.5 milyar ton beton üretilmektedir ve bu miktar dünya nüfusuna oranlandığında kişi başına yaklaşık 1000 kg beton üretildiği ortaya çıkmaktadır (Özkul vd., 1999; Shah vd., 2003).

Betonun vazgeçilemez üç ana özelliği, taze halde işlenebilme, sertleşmiş halde yeterli dayanım ve dış ortam etkilerine dayanıklılıktır (Akman, 1992). Yapıyı veya yapı elemanını oluşturan malzemenin belirli bir dayanıma sahip olması güvenliğin sağlanmasında en önemli koşuldur (Akman, 1989). Basınç dayanımı ile denetlenen, çekme dayanımı çok düşük, gevrek bir malzeme olan beton ile taşıyıcı sistemler oluşturmak, zor ve ekonomik olmayan çözümler gerektirir. Akla gelen ilk çözüm, eski çağlarda taşın kullanılmasına benzer biçimde, eleman ve sisteme, kemer ve kubbe gibi kesitlerde yalnız basınç oluşturacak bir form vermektir. Ancak bu tür yapı geometrileri birçok durumda fonksiyonel ve ekonomik olmayabilir. İkinci çözüm ise çekme gerilmelerinin betonun içine yerleştirilen, çekme dayanımı ve sünekliği yüksek başka bir malzeme ile karşılanmasıdır. Bu ikinci çözüm, mühendislik açısından çok daha uygundur ve çekme gerilmelerini karşılamak için genelde beton içine çelik çubuklar yerleştirilir. Çelik ve betondan oluşan bu kompozit yapı malzemesi betonarme olarak adlandırılır (Ersoy ve Özcebe, 2001). Mühendislik alanında çok yaygın olarak kullanılan çelik, çekme dayanımı yüksek sünek bir metaldir. Betonarme çelikleri düşük karbonlu (%0.1- %0.2) yumuşak çeliklerdir, bazı durumlarda daha sert, karbon oranı %0.35'e varan çelikler de kullanılmaktadır. Çelikler, %0.2 kalıcı şekil değiştirme esasına göre tayin edilen akma sınırına göre sınıflandırılır (Akman, 1992). Betonarme yapılarda çelik ile beton arasında yeterli aderans bulunması gerekir ancak bu aderans sayesinde çelik ile beton bir arada çalışarak betonarme sistemi meydana getirir (Postacıoğlu, 1981). Taşıyıcı sistem malzemesi olarak betonarme, kolay biçim verilebilmesi ve bütün elemanların birlikte çalışmasını sağlayan monolitik yapı ile yeni taşıyıcı sistemlerin gelişmesinde büyük rol oynamaktadır (Aka vd., 1996). Betonarme, 19. yüzyılın ikinci yarısında icat edilmiş olmasına, bilimsel ve teknik olarak 20. yüzyılın başlarından itibaren incelenmesine karşın inşaat teknolojisine getirdiği yeni boyutlar ve olanaklar nedeni ile günümüzde yapı üretim teknolojisinin esas taşıyıcı malzemesi haline gelmiştir. Bu üstün özelliklerine rağmen betonarme elemanlar da çeşitli etkilerle hasara uğrar (Aköz vd., 2000).

Beton, bünyesinde veya hemen yakın çevresindeki sıcaklık değişimi, nem ve kimyasal maddelerin varlığı ve taşınım mekanizması betonun kalıcılığını etkileyen önemli faktörlerdir (Baradan vd., 2002; Neville ve Brooks, 2001). Zararlı kimyasal reaksiyonlar, betonun yumuşamasına, gözenekliliğinin ve geçirimsizliğinin artmasına neden olur. Bazı yapılarda beton, birçok kimyasal etkiye aynı anda maruz kalabilir ve bu etkiler bir diğerini ortaya

çıkarabilir veya etkiyi şiddetlendirebilir. Betonda kimyasal reaksiyonlara ve zamanla bozulmaya neden olan iyon veya molekül halindeki zararlı maddeler çoğunlukla çevreden taşınır; bazı hallerde zararlı maddeler betonun kendi bünyesinden de kaynaklanabilir. Bu durumda da zararlı maddelerin reaksiyona girecekleri yere taşınması gerekir; madde transferi olmaz ise zararlı reaksiyonlar gelişemez. Dolayısı ile beton bünyesinde kimyasal reaksiyonların oluşmasının ön koşulu, taşınmaya neden olan su veya su buharının varlığıdır. Zararlı maddelerin taşınım hızı yavaş olduğundan, bazı reaksiyonların zararlı etkileri yıllar sonra ortaya çıkabilir. Tüm kimyasal reaksiyonlarda olduğu gibi betondaki reaksiyonlarda da sıcaklık, reaksiyon hızını arttıran önemli bir faktördür. Kimyasal reaksiyonlar, çoğunlukla fiziksel ve biyolojik etkenler ile bir arada veya bunları izleyen süreçte gelişir ve betonun bozulmasına neden olurlar (Baradan vd., 2002).

2.2 Kalıcılığa Etki Eden Faktörler

Betonda mekanik etkiler dışında bozulma süreçlerini kontrol eden ana faktör, ortamda su veya nemin varlığıdır; çünkü su, beton içine zararlı maddeleri taşır ve kimyasal reaksiyonların oluşumunu hızlandırır. Suyun taşınımı, beton içerisindeki boşlukların türüne, çapına, dağılımına ve mikro veya makro boyuttaki çatlakların varlığına bağlıdır. Bu nedenle kalıcılığın sağlanabilmesi için beton bünyesindeki boşlukların dağılımının kontrol edilmesi ve çatlakların oluşumunun engellenmesi gerekir. Beton bünyesinde veya hemen yakın çevresindeki sıcaklık, nem ve kimyasal maddelerin taşınım mekanizması betonun kalıcılığını etkileyen önemli faktörlerdir (Baradan vd., 2002). Betonun dayanıklılığını olumsuz olarak etkileyen bazı önemli kimyasal ve fiziksel olaylar, betonda kalsiyum hidroksitin çözünmesi ve beton yüzeyinde çirçiklenme oluşması, sülfat etkisi, deniz suyu etkisi, asit etkisi, karbonatlaşma, alkali agrega reaksiyonu, beton içerisine yerleştirilen çelik donatının korozyonu, donma-çözünme etkisi, beton yüzeyinin pullanması ve aşınmadır (Erdoğan, 2003). Betonun dayanıklılığını olumsuz etkileyen bu olaylar aşağıda açıklanmıştır.

2.2.1 Aşınma

Aşınma, yavaş gelişen fiziksel ve mekanik bir olaydır. Beton yüzeyine sürtünme veya çarpma şeklinde gelen kuvvetler betonun yüzeyini törpülercesine etki yaratmakta ve yüzeyin aşınmasına yol açmaktadırlar. Barajlarda, dolu savaklarda, tünellerde ve bazı su taşıyan sistemlerdeki betonlarda oluşan kavitasyon hasarı da aşınma konusu ile ilgilidir. Beton yüzeyinin aşınmasını ölçmek için aşınma gösteren beton yüzeyindeki kaybın derinliği ölçülür veya ağırlık kaybını esas alan deneyler uygulanır (Erdoğan, 2003). Betonun basınç dayanımı,

aşınmaya karşı direncini belirleyen ana etmendir. Betonda iyi bir aşınma direnci elde edilebilmesi için kür süresinin normalden iki kat uzun tutulması tavsiye edilmektedir (Felekoğlu vd., 2003).

2.2.2 Donma-çözünme Etkisi

Soğuk iklim bölgelerinde yapılacak barajlar, köprü kirişleri beton yol döşemeleri, hava meydanı pistleri, binaların çıplak kalacak yüzeyleri gibi atmosfer etkilerine maruz kalacak elemanlarda donma-çözülme etkisine dayanıklılık şartı aranır (Akman, 1987). Beton boşluklarında suda eriyik halde bulunabilen tuzların etkisi ile, 0 °C'den biraz daha düşük sıcaklıklarda donmakta, buza dönüşen suyun hacmi yaklaşık %9 kadar artmaktadır. Kapiler boşluklar tamamen veya %91'den daha çok su ile dolu olduklarında, donmanın başlaması ve suyun bir miktarının buz haline dönüşmesi ile ortaya çıkan hacim artışı, boşluklarda henüz donmamış durumdaki su üzerinde hidrolik basınç yaratmakta, su boşluklardan dışarıya itilmekte, zorlanan su boşlukların etrafındaki çimento hamurunun çatlamasına yol açacak büyüklükte gerilmeler yaratmaktadır (Erdoğan, 2003; Neville, 1990; Akman, 1987; Şahin vd., 2003; Felekoğlu vd., 2003).

Beton yollarda, kaldırımlarda park yerlerinde ve hava alanı pistlerindeki beton yüzeyinde kışın oluşan buz tabakasını engellemek için tekrarlanan aralıklar ile yüzeye kalsiyum klorür (CaCl_2), sodyum klorür (NaCl) gibi buz çözücü tuzlar serilmektedir (Neville, 1990). Buz çözücü tuzların serilmesi ile beton yüzeyinde buzların çözülmesi için büyük bir ısı enerjisi harcanmakta bu durum, yüzeyin hemen altındaki beton tabakasının sıcaklığında ani bir düşüş yaratmaktadır. Bu da, yüzeyin hemen altındaki beton tabakasının donmasına veya sıcaklık farklılıklarının yarattığı gerilmelerden dolayı deformasyonların oluşmasına yol açmaktadır. Buzların çözülmesi ile beton yüzeyinde biriken serbest su, yüzeyde ve yüzeyin hemen altındaki beton tabakasında buz mercikleri oluşturmaktadır. Buz çözücü tuzların erimesi sonucunda yüzeyin hemen altındaki bölgeye iyon konsantrasyonu yüksek eriyikler yerleşmekte; daha sonra yüzeye biriken yağmur suları ile yüzeyin hemen altındaki eriyiğin konsantrasyonunun farklı oluşu, bu iki ortam arasında osmotik basınç yaratmaktadır. Bu olaylar, beton yüzeyinin ince tabakalar halinde gevşeyip kopmasına, yüzeyden ince bir tabakanın pul gibi sıyrılıp çıkmasına dolayısı ile pullanma denen olaya neden olmaktadır (Erdoğan, 2003). Johsson (2002) tarafından yapılan çalışmada, beton üretiminde %70'lere varan oranlarda yüksek fırın cürufunun kullanılmasının çok iyi donma-çözülme direnci sağlandığı ifade edilmektedir.

2.2.3 Alkali-Agrega Reaksiyonu

Betonda genleşen ürün meydana getiren bir diğer reaksiyon da alkali agrega reaksiyonudur. Alkali-agrega reaksiyonu (AAR) sonucu oluşan alkali-silikat-hidrate jeli çimento hamurundan su emerek şişer, hamurda mikro çatlaklar oluşturur, betonun su emmesi artar. Su emmenin artması ile artan jel oluşumu çatlakları büyütür, özellikle agrega çimento arayüz bağıni zedeler ve betonun parçalanmasına yol açar. Çimentodaki alkali içeriğinin 2.1 bağıntısı ile hesaplanan Na_2O eşdeğerinin %0.6 değerini aşması ve agregada aktif silika bulunması alkali-agrega reaksiyonunun başlaması için yeterli değildir çünkü reaksiyona sadece toplam alkaliler değil, ara yer sıvısında çözünebilen ve etkisi birbirinden farklı olan alkali iyonları da etki eder (Baradan vd., 2002; Akman, 2002).

$$(\text{Na}_2\text{O})_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O} \quad (2.1)$$

Bazalt, andezit, dasit, riyolit gibi volkanik kayalar ile kumtaşı ve tüflerin hasar verici kayalar olduğu belirtilmiştir (Wakizawa, 2000). Silisli agregalarda alkali silika reaksiyonu (ASR), kalsitik dolomitlerde ve dolomitik kireçtaşlarında alkali karbonat reaksiyonu (ACR) olmak üzere iki tip reaksiyondan bahsedilir (Neville, 1990). Alkali silika reaksiyonunda oluşan jelin karakteristik bileşimi henüz tam olarak belirlenememiştir ancak jelin silisyum, sodyum, potasyum, kalsiyum ve magnezyum bileşikleri içerdiği sanılmaktadır (Baradan vd., 2002). Bazı kaynaklarda XRD analizinde bu ürünün zeolite benzediği ve kimyasal bileşiminin $(\text{NaAlSiO}_4)_{12.27} \text{H}_2\text{O}$ veya $(\text{CaAl}_2\text{SiO}_4)_{12.27} \text{H}_2\text{O}$ olduğu, jel ve kristal ürünlerinin agrega harç arayüzünde ve hava boşluklarında meydana geldiği belirtilmiştir (Marfil ve Maiza, 2001). Konu ile ilgili çalışmalarda düşük alkali içeriğine sahip puzolan malzemelerin yüksek alkali içeriğine sahip olanlara kıyasla boşluk çözeltisindeki alkaliniteyi indirgemede ve ASR sonucu oluşan genleşmeyi azaltmada daha etkili olduğu (Duchesne ve Berube, 2001), alkali oksit eşdeğeri yüksek olan çimento ile içinde aktif silika bulunan ve alkali silika reaksiyonuna yol açan agregaların kullanılmasının zorunlu olduğu durumlarda, bağlayıcı maddeye cüruf gibi bir puzolan malzeme ilave edilerek reaksiyon hızının azaltılabileceği ifade edilmektedir (Baradan vd., 2002; Postacıoğlu, 1987; Shehata ve Thomas, 2002).

2.2.4 Suyun Etkisi

Atmosfer veya zemin suyu etkisine maruz kalan yapılar zamanla hasara uğrar. Yapının sudan korunması, o yapının servis ömrünün uzatılması anlamına gelir. Su etkisi ile yapıların üretiminde kullanılan gözenekli malzemelerde, nemlenme, ıslanma, çiçeklenme, erime, çatlama, vb. olaylar meydana gelir. Su, metallerde de korozyona neden olur, yapıda hasarlar

meydana gelir. Onun içindir ki geçirimsizlik, yüksek performanslı betonda aranan temel özelliklerden biridir (Aköz, 2005).

Çimentodaki kalsiyum silikatlı ana bileşenlerin su ile reaksiyonları sonucunda, çimento hamuruna bağlayıcılık özelliği kazandıran C-S-H jellerinin yanı sıra, suya karşı dayanıklı olmayan kalsiyum hidroksit $[Ca(OH)_2]$ kristalleri de oluşmaktadır (Neville, 1990; Akman, 1987; Baradan vd., 2002). Dışarıdan herhangi bir yolla betonun içerisine sızan sular, $Ca(OH)_2$ 'in çözünmesine yol açmaktadır (Aköz, 2005). Suyun sızması ile beton içindeki tuzlar da eriyik duruma dönüşür, bu tuzları ve çözünen $Ca(OH)_2$ içeren su, kapiler boşluklardan betonun yüzeyine doğru hareket eder. Beton yüzeyine çıkan suyun buharlaşması sonucunda, suyun içerisinde bulunan $Ca(OH)_2$ ve tuzlar, yüzeyde ince bir çökelti tabakası oluşturur. $Ca(OH)_2$ havadaki karbondioksit ile birleşerek kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) haline dönüşür, bu olaya çiçeklenme denir. Oluşan çökeltinin büyük bir kısmı $CaCO_3$ olduğu için birikinti tabakası beyaz renkte görülmektedir. Bu kimyasal olayda $CaCO_3$ 'ın yanı sıra çok az miktarda sodyum sülfat, sodyum karbonat, sodyum bikarbonat, sodyum silikat, potasyum sülfat, kalsiyum sülfat ve magnezyum sülfat gibi bileşenler de bulunabilir. Betonun yerleştirilmesini takip eden ilk aylarda büyük hızla gelişen çiçeklenme olayı, zamanla azalmakta ve genellikle üç-dört yıl sonra, hemen hemen sona ermektedir. Ancak su etkisine maruz kalan geçirimli betonda çiçeklenme olayı devam ettikçe beton daha boşluklu duruma gelmekte ve bu durumda betonun dayanımı özellikle de dayanıklılığı olumsuz yönde etkilenmektedir. Özetle, boşluklu betona zararlı suların sızması ve betonda hasar oluşturması daha kolay olmaktadır (Erdogan, 2003; Akman, 1992).

Çakır ve Aköz (2001) tarafından yüksek fırın cürufu betonlar üzerinde yapılan deneysel çalışmada, beton üretiminde ince malzemeden %10 ve %20 azaltılarak yerine %30 ve %60 oranlarındaki yüksek fırın cürufu katılmasının, 7., 28., 90., 180. ve 300. günlerde yapılan deney sonuçlarına göre, kapiler su emmeyi ve zahiri poroziteyi azalttığı, porozite ve kapiler su emmedeki azalma ile betonun, suyun zararlı etkisine karşı performansının arttığı ifade edilmektedir.

Bagel (1998) tarafından yapılan deneysel çalışmada, yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı gibi silisli yan ürünlerin harç ve beton üretiminde kullanılması ile sertleşmiş betonun boşluk yapısı ve geçirimsizlik özelliklerinde iyileşme görüldüğü ifade edilmektedir.

2.2.4.1 Asitli Suların Etkisi

Yapıyı etkileyen ve sertleşmiş betonun içerisine sızan sularda bulunan asitlerin betonda yarattığı yıpratıcı etki asit hücumu olarak adlandırılmaktadır (Uğurlu, 2003). Asit hücumuna maruz kalan sertleşmiş betonun içerisindeki Ca(OH)_2 ve C-S-H jellerin çözünmesi sonucu beton yüzeyinde çamur gibi yumuşak ince bir tabaka oluşmakta, beton daha gözenekli duruma gelerek dayanımı ve dayanıklılığı azalmaktadır (Erdoğan, 2003; Neville, 1990; Akman, 1987). Yapıyı etkileyen asitlerden havadaki karbonik asit (H_2CO_3), CO_2 'in su içerisinde çözünmesi ile oluşmaktadır. Kırlardaki akarsular ve kar suları bu tür zayıf asitleri içerebilmektedirler. Ayrıca değişik endüstri kollarında, üretime bağlı olarak açığa çıkan veya üretimde kullanılan asitler, endüstri yapılarını ve deşarj ünitelerini etkilemektedir. Bu asitler, örneğin kimya endüstrisinde hidroklorik asit (HCl), gübre endüstrisinde nitrik asit (HNO_3) ve fosforik asit (H_3PO_4), fermantasyon işleminde asetik asit ($\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$), gıda ve boya endüstrisinde formik asit ($\text{H.CO}_2\text{H}$), süt endüstrisinde laktik asit ($\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH}).\text{CO}_2\text{H}$), deri endüstrisinde tannik asit ($\text{C}_{76}\text{H}_{52}\text{O}_{46}$) ve şarapçılık endüstrisinde tartarik asit [$\text{CH(OH).CO}_2\text{H}$]₂ olarak sıralanabilir (Erdoğan, 2003).

2.2.4.2 Sülfatlı Suların Etkisi

Yeraltı sularında, bazı killi topraklarda ve cüruf ile doldurulmuş arazilerde oldukça yüksek oranda sodyum sülfat, kalsiyum sülfat, magnezyum sülfat ve potasyum sülfat gibi tuzlar bulunabilir. Çevresel etkilere bağlı olarak deniz suyunda da önemli oranda sülfat bulunur (Erdoğan, 2003; Akman, 1992). Sızan su içinde bulunan sülfat iyonları, başta çimentonun ana bileşenlerinden olan trikalsiyum silikat ve dikalsiyum silikat'ın (C_3S ve C_2S) hidrasyon ürünü olan ve çimento baz özelliği kazandıran kalsiyum hidroksit [Ca(OH)_2] ile birleşerek kalsiyum sülfat (CaSO_4), trikalsiyum alüminat (C_3A) ile birleşerek kandilot tuzunu [$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.3\text{CaSO}_4.32\text{H}_2\text{O}$] oluşturur (Aköz vd., 1995; Atahan vd., 2003). Bu tuz, 32 molekül gibi çok fazla oranda su içerdiğinden hacim artışına ve betonda çatlak oluşumuna neden olur; ayrıca ana bileşenin yapısını bozduğu için de betona zararlı etki yapar. Örneğin her ikisi de sülfat olmasına rağmen aynı koşullarda sodyum sülfat ile magnezyum sülfatın etkisi farklıdır. Magnezyum sülfat (Mg SO_4), C_3A 'dan başka C_3S 'in de yapısını bozar, çatlak oluşumundan başka çimento hamurunun erimesine de neden olur (Aköz vd., 1995; Kılınç ve Uyan, 2003). Sülfatlı suların etkisine maruz kalan betonların yüzeyi, karakteristik olarak beyazımsı bir görünüm almaktadır. Sülfatların yıpratıcı etkisi, genel olarak beton blokların kenarından ve köşelerinden başlamaktadır. Bu etki daha sonra betonun iç kısımlarına doğru

yoğunlaşarak, beton yüzeyinin tabaka tabaka büyük parçalar halinde parçalanmasına neden olmaktadır (Erdoğan, 2003; Uğurlu, 2003).

2.2.4.3 Klorürlü Suların (Deniz Suyunun) Etkisi

Deniz suyundaki klorür, betonun içerisinde sülfat etkisi ile oluşan alçıtaşının ve etrenjitin bir miktarını çözerek betonun yüzeyine çıkmasına yol açmaktadır. Böylelikle alçıtaşının ve etrenjitin, sertleşmiş betondaki genleşme etkisi bir miktar azalmaktadır. Deniz suyu etkisindeki betonlar, gözeneklerinde biriken tuz kristallerinin yarattığı basınç nedeni ile genişip yıpranabilmektedir. Bu olay, betonun su seviyesi üzerinde kalan bölgelerinde gelişmekte, suyun gel-git hareketi ile yükselip alçalması sonucunda beton yüzeyinin bir bölümü, ıslanma-kuruma etkisinde kalmakta, bu bölge devamlı su içinde bulunan betona kıyasla daha çok hasar görmektedir (Erdoğan, 2003; Aköz, 2005). Deniz suyunda bulunan klorürlü sular ayrıca betonda klora-alüminat tuzu ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{CaCl}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) oluşumuna neden olur (Yüzer, 1998). Yapıyı etkileyen yeraltı sularında bulunan magnezyum klorür (MgCl_2), sertleşmiş çimento hamurundaki kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek 2.2 bağıntısında görüldüğü gibi çözünen CaCl_2 ve çözünmeyen $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (brüsit) meydana getirir.



Betonun magnezyum tuzlarıyla uzun süreli teması halinde ise CSH içindeki kalsiyum, Mg^{++} iyonlarıyla yer değiştirir ve magnezyum silikat hidrat (MSH) oluşturur; oluşan MSH jelinin bağlayıcılık özelliği yoktur, kolayca parçalanabilir (Baradan vd., 2002; Aköz vd., 1996a). Kurdowski tarafından klorür korozyonunun çimento pastası üzerindeki etkisinin araştırıldığı iç yapı çalışmasında, CSH'ın MgCl_2 içerikli yoğun klorür konsantrasyonunda hızlı bir şekilde dekalsifikasyona uğradığı ve oluşan yeni fazların Brüsit ve temel magnezyum klorür olduğu, ayrıca magnezyum silikat hidratenin de olduğu ancak amorf olduğu için tespit edilmesinin güç olduğu ve belirlemede en iyi yöntemin EDAX'lı SEM metodu olduğu ifade edilmektedir (Kurdowski, 2004). Pruckner ve Gjörv (2004) tarafından CaCl_2 ve NaCl 'ün taze harca katılması suretiyle yapılan deneysel çalışmada, CaCl_2 'ün çözünen hidroksil iyon miktarını azalttığı veya ortamın pH seviyesini düşürdüğü, NaCl 'ün ise hidroksil iyon miktarı veya pH seviyesini arttırdığı ifade edilmektedir. Klorürler daha çok donatı korozyonunu hızlandırır, meydana gelen korozyon ürünlerinin hacmi, demirin hacminden çok büyük olduğu için donatı çevresinde hacim artışına, dolayısı ile betonda çekme gerilmelerinin doğmasına ve çatlak oluşumuna neden olur (Yüzer, 1998).

2.3 Metallerin Korozyonu

Genel olarak malzemelerin, özel olarak metallerin ve alaşımlarının çevrenin etkileriyle kimyasal ve elektrokimyasal değişme ya da fiziksel çözünme sonucu aşınmalarına korozyon denir (Üneri, 2002). Latince’de kemirmek anlamına gelen “con rodere” sözcüğünden türetilmiş olan korozyon, metallerde su ve oksijenin bulunduğu ortamda görülen kimyasal bir değişim sürecidir. Altın dışındaki tüm metaller, en düşük enerji düzeyi olan oksit haline dönmeye eğilimlidirler ve yapay olarak üretilen metal malzemeler uygun ortamı bulduklarında asıllarına dönmeye çalışırlar (Erdoğan, 2003; Baradan vd., 2002).

Korozyon bir yüzey olayıdır, yani yüzeyden başlayarak malzemenin içine doğru ilerler. Buradaki tek istisna hidrojen gevrekliğidir. Metal yüzeyinde hidrojen atomunun oluşmasına neden olan reaksiyonlar sonucu bu atomların metal içine yayılabilmeleri ve belirli noktalarda yığılan bu atomların birleşerek hidrojen gazı oluşturmaları sonucu metal, meydana gelen gaz basıncına dayanamaz, içten başlayarak çatlar. Bu olay hariç tüm diğer korozyon türleri metalleri yüzeyden başlayarak etkiler ve korozyona neden olur (Çakır, 1996). Metallerin sulu ortamdaki korozyonu elektro-kimyasal bir süreçtir (Akman, 1992; ACI 222R, 1996) ve birbirinden ayrı ancak aynı zamanda meydana gelen oksidasyon ve redüksiyon reaksiyonlarından oluşur.

Anot reaksiyonu da denen oksidasyon, sulu ortamdaki metalin elektron kaybederek katyona dönüşmesidir (2.3); elektron kaybeden metal elemana anot denir. Anodik olay elektron üretir. Bu elektronların olay yerinden uzaklaştırılması mümkün değilse veya bu işlem yeterli hızda gerçekleşmiyorsa anodik olayın tamamen durması veya hızından kaybetmesi gerekir. Başlangıçta yüksek enerjiye sahip olan metal iyonları belirli sayıda su molekülü ile bağ kurarak alçak enerji durumuna geçer ve kararlılık kazanırlar (Doruk, 1996).



Redüksiyon yani katot reaksiyonu ise oksidasyonda açığa çıkan elektronların sarf edilerek birikmesini önleyen bir reaksiyondur. Katot reaksiyonları arasında en yaygın olanı, hidrojen gazının açığa çıkması (2.4) ve oksijen gazının redüklenmesidir (2.5). Katodik olayın oluşabilmesi için elektron yüklenebilen iyon veya moleküllere ihtiyaç vardır (Doruk, 1996).



Anot reaksiyonunda meydana gelen metal iyonu, bulunduğu sulu ortam içinde çözülür, dağılır veya çökelen bir korozyon ürünü meydana getirir, böylece anot olan metalde malzeme kaybı

oluşur. Korozyonun sürekliliği için katot ve anodun elektriksel akım geçişini sağlayan bir iletkenle bağlı olması ve anotta açığa çıkan elektronların katoda iletilmesi gerekir (Akman, 1992). Elektrik akımının katı içindeki yönü, katotdan anoda doğrudur; yani elektronların akış yönünün zıttıdır. Korozyon hızı olarak tanımlanan anodun çözünüm hızı, hücreden geçen akım ile doğru orantılıdır (Doruk, 1996).

2.3.1 Donatının Korozyonu

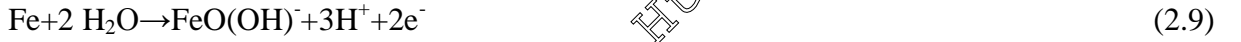
Betonarme yapılarda beton içine gömülü olan çelik, doğru tasarlanmış, geçirimsiz, kaliteli beton tarafından fiziksel ve kimyasal olarak korunur. Fiziksel koruma zararlı maddelerin donatıya ulaşmasının engellenmesi, kimyasal koruma ise yüksek pH'lı bir ortam yaratılması ile gerçekleşir (Baradan vd., 2002; ACI 222R, 2001; Liu, 2000). Çelik donatı yüzeyinde korozyonun başlaması için buraya su ve korozif element, oksijenin erişmesi gerekmektedir. Klorür iyonları pasif metal yüzeyine erişmiş iseler, çelik donatı yüzeyindeki pasif tabaka tahrip olur ve altında açığa çıkan metal, betonun geçirimsizliğine bağlı olarak yüzeye erişen su ve oksijenin etkisi ile hızla korozyona uğrar (Çakır, 1997). Betonarme elemanlardaki çelik çubuğun korozyonu için başka bir iletkeni ihtiyacı yoktur; aynı çelik çubuk üzerinde elektro-kimyasal tam hücre kendiliğinden oluşur. Rutubet veya su, elektrolitik ortamı, çeliğin kendisi de elektronları ileten elektronik iletkeni oluşturur. Oksijen konsantrasyonundaki farklılık çelik üzerinde anot ve katot bölgelerini meydana getirir. Bunlardan oksijeni az olan bölgeler hasar gören anot, çok olan bölgeler ise korunan katottur. Oksijen paradoksuna göre, paslanma, oksijenin nispeten az bulunduğu bölgelerde daha belirgindir (Akman, 1992; ACI 222R, 1996).

Elektro-kimyasal bir süreç olan beton içindeki çeliğin korozyonunda, dış elektriksel kaynak olmaksızın iki yarı hücre reaksiyonu meydana gelir. Bunlardan biri, pH değerlerine bağlı olarak meydana gelen 2.6-2.9 bağıntılarında görüldüğü gibi demirin oksidasyonu sonucu ferro iyonları oluşturan yani elektron üretme kapasitesi olan **anodik reaksiyon**, diğeri de hidroksil iyonu (OH^-) meydana getirerek oksijeni azaltan, elektronları tüketen (2.10) **katodik reaksiyondur**. Oksijenin betona giriş hızı betonun suya doygunluk derecesinden etkilenir; ıslanma-kuruma etkisine maruz elemanlarda korozyon çok daha hızlı gelişirken, tamamen suya doygun elemanlarda ihmal edilebilir mertebelerde kalmaktadır. Oksijen, katodik reaksiyonda harcandığı için su içinde çözülmüş olmalıdır. Dolayısı ile oksijenin suda çözünürlüğünü etkileyen tüm faktörler reaksiyonun hızını da etkilerler (Baradan vd., 2002).

Bu iki reaksiyon, birbirinden uzak bölgelerde meydana geliyor ise makro-hücre, yakın bölgelerde hatta aynı bölgede meydana geliyor ise mikro-hücre olarak adlandırılır (ACI 222R, 2001; Üneri, 2002; Akman, 1992). Anotta oluşan Fe^{2+} iyonları katoda taşınmaz ancak

katotdan gelen OH⁻ iyonları ile birleşerek anot çevresinde iki değerlikli Fe(OH)₂'ye dönüşür. Kararsız ve çözünen bir hidroksit olan Fe(OH)₂, daha sonra anot çevresindeki oksijen ve su ile kararlı bir hidroksit olan Fe(OH)₃'e dönüşerek anot çevresine veya sıvı dibine çöker. Fe(OH)₃, Fe₂O₃ demir oksidinin hidroksitidir ve büyük hacim genleşmesi ile meydana gelen sarı renkli boşluklu bir cisimdir (Akman, 1992). Oluşan demiroksit veya demirhidroksit tabakasının bünyeden ayrılması küçük de olsa kütlede ağırlık kaybına neden olmakta ancak ihmal edilebilir olan bu kayıplar hacim artışı nedeni ile betonda çatlamalara neden olmaktadır (Andrade vd., 1993). Çünkü oluşan demir hidroksitler, oluştukları demirden daha fazla özgül hacimlere sahiptir (ACI 222R, 2001).

Anodik reaksiyon;



Katodik reaksiyon;

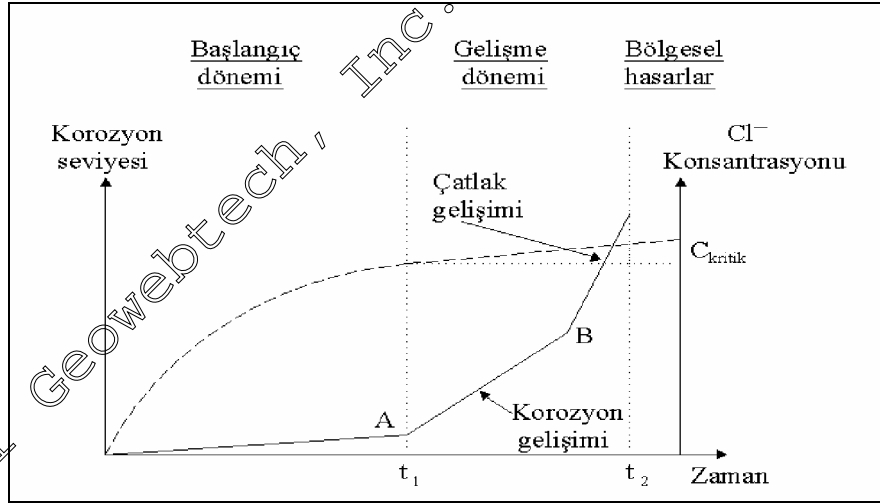


Bu reaksiyonlardan demirin yükseltgenmesi düşük pH'ta, diğer reaksiyonlar ise orta pH değerlerinde gerçekleşir. Meydana gelen oksit ve hidroksitler arasında Fe(OH)₃ ve Fe₃O₄ karardır. Bu arada Fe(OH)₂ de oluşur, ancak bu hidroksit hızla kararlı olan Fe(OH)₃'e dönüşür. Pasivasyonu sağlayan ve donatıyı kaplayan pas tabakası da Fe(OH)₃'tür (Akman, 1992). Anot ve katotun uzayda farklı konumlarına bağlı olarak beton içindeki donatının korozyonu mikro-hücre ve makro-hücre gibi iki farklı formda meydana gelmektedir. Mikro-hücre korozyonunda, anot ve katot reaksiyonları birbirine çok yakın bölgelerde meydana geldiğinden donatı yüzeyinde üniform demir çözülmesi meydana gelmektedir. Üniform korozyon genellikle betonun karbonatlaşması ve donatıda yüksek klorür konsantrasyonunda oluşur. Makro-hücre potansiyelinde ise, donatının korozyona uğramış bölgesi (anot) ile korozyon oluşmayan pasif yüzey (katot) bölgesi arasında belirgin mesafe vardır ve klorür etkisi altında oyuklanma türü korozyonda meydana gelir (Elsener, 2002).

Örtü betonun geçirimli, kalınlığının yetersiz olması veya dökülmesi ile tamamen açıkta kalan çelik donatıda atmosferik korozyon görülür (Baradan vd., 2002; Erdoğan, 2003). Örneğin,

geçirimli betonda atmosferdeki CO₂ gazı, hidrate çimento bileşenleri ile özellikle de beton içindeki kireçle reaksiyona girerek kalsiyum karbonat oluşturur, betonun pH değerini indirir. Karbonatlaşma bölgesinin donatıya ulaşması ile donatı çevresindeki alkali ortam yok olur ve kimyasal koruma sona erer. Beton içine gömülü çelik donatının korozyondan korunması için gerekli en düşük pH değeri ile ilgili olarak bazı kaynaklarda, pH değerinin 9.5'un altına inmesiyle pasif tabakanın kararlılığının kaybolduğu, bazı kaynaklarda ise 11.5 değerinin altına düşmesi durumunda korozyon görülme olasılığından söz edilmektedir. Bu nedenle kireci tespit eden ve pH'ı düşüren puzolanik maddeler, atmosfer koşullarına maruz betonarme betonlarında donatı korozyonuna olumsuz etki eder. Kimyasal korumanın yok olmasının bir diğer nedeni de klorür iyonlarının donatıya ulaşmasıdır. Bu durumda da donatı çubuğunun üzerinde oluşan ve metalin korozyonunu engelleyen pasif tabaka kararlılığını kaybederek çözünür (Akman, 1992; Baradan vd., 2002; ACI 222R, 2001).

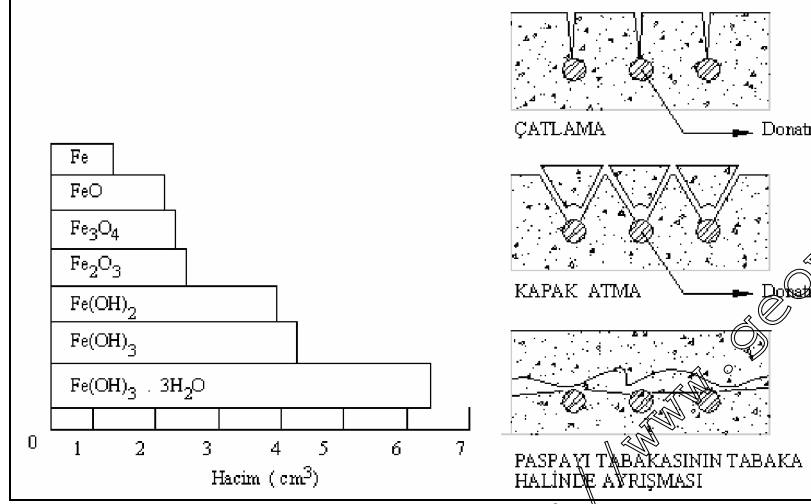
Betonarme donatısının korozyonu, betonarme elemanda klorür penetrasyonunun doğal bir sonucudur. Donatı korozyonu açısından betonarme yapının servis ömrü Şekil 2.1'de görüldüğü üzere başlangıç dönemi (t_1) ve gelişme dönemi (t_2) olmak üzere iki ana dönemde ele alınabilir.



Şekil 2.1 Betonda donatı korozyonu sırasının şematik gösterimi (Poupard vd., 2004)

Başlangıç dönemi (t_1), boşluklu malzemeye klorür penetrasyonuna ve klorür iyonlarının donatı etrafında birikimine karşılık gelir ve bu süreç, örtü betonunun geçirimsizliğine, sürekliliğine ve kalınlığına bağlı olarak korozyonu başlatmak için gerekli klorür konsantrasyonundan etkilenmektedir. Gelişme dönemi (t_2) ise, betonarme çelik yüzeyine ulaşan klorür iyonlarının çeliğin yüzeyini depasivasyona uğratmasına bağlı olarak korozyonun gelişimini ve yapıda bölgesel hasarlar oluşmasına karşılık gelmektedir (Poupard vd., 2004).

Donatının korozyona uğraması sonucu Şekil 2.2’de görüldüğü üzere, %600’leri geçen hacim artışı nedeni ile betonarme elemanlarda, betonun çatlaması, kapak atması ve örtü betonunun tabaka halinde ayrışması kaçınılmaz olmaktadır.



Şekil 2.2 Korozyon ürünlerinin hacimleri ve korozyon sonucu betonda görülen hasarlar (Baradan vd., 2002; ACI 222R, 2001)

Betonarme veya öngerilmeli beton yapılarında oluşan donatı korozyonu yapının stabilitesi açısından çok önemli sonuçlar doğurur. Çelik donatı korozyon sonucu kesit ve düktilite kaybına uğrar. Oluşan reaksiyon ürünleri nedeniyle betonda meydana gelen hacim artışı önceleri örtü betonunun çatlamasına, ilerleyen aşamalarda ise tamamen dökülmesine neden olur (Baradan vd., 2002; Yüzer ve Aköz, 2003a; Erdoğan, 2003). Bu durumda, hiçbir koruması kalmayan donatının çok hızlı kesit kaybetmesi ve ciddi hasarların oluşması sonucu onarım ve güçlendirme yapılması kaçınılmazdır. Birleşik Devletler’de karayolu yapılarının donatı korozyonu kaynaklı onarım ve rehabilitasyonu için 20 Milyar \$, İngiltere’de sadece yol köprüleri için 600 Milyon £’ün üzerinde para gerekmekte olduğu bildirilmektedir (Alınışallam, 2001).

2.3.2 Betonarme Donatısında Klorür Korozyonu

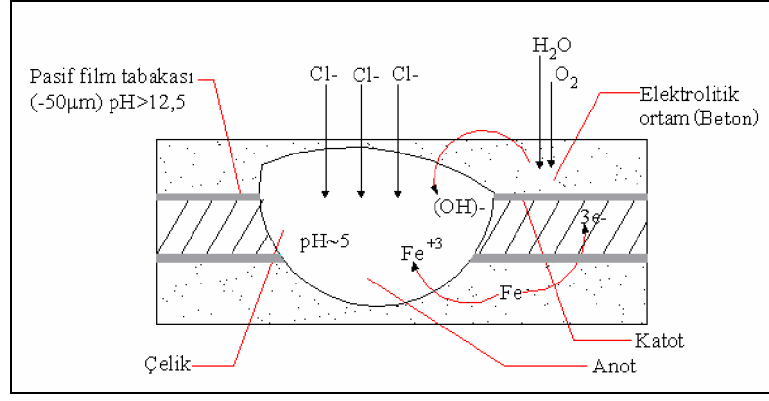
Bölüm 2.3.3.4’te de işaret edildiği gibi klorür iyonları çelik donatının korozyonu açısından en zararlı madde olarak kabul edilirler. Çelik donatı üzerinde oluşan ve korozyonun gelişimini engelleyen pasif tabakanın çözünmesine yol açmaları bu etkilerden en önemlisidir (Baradan vd., 2002, Yüzer ve Aköz, 2003b; Güneysisi vd., 2003; Liu, 2000). Çelik donatı yüzeyine ulaşan klorürün pasif filmin tahribinde oynadığı rol ile ilgili değişik teoriler vardır. Bunlardan oksit film teorisine göre, klorür iyonu pasif film tabakasına nüfuz eder, filmi parçalayarak

korozif element olan oksijen ve suyun metal yüzeyine erişerek metalin korozyona uğramasına neden olur. Adsorbsiyon teorisine göre ise, metal yüzeyine adsorbe olan klorür iyonları metal iyonlarının daha çabuk çözünmesine, çözünebilir bileşikler oluşturmasına veya pasifleştirici elemanların yerlerinden uzaklaştırılmasına neden olur. Bir başka teoriye göre ise korozyon sonucu oluşan iki değerlikli demir iyonları OH^- iyonları yerine Cl^- ile birleşir ve çözünebilir demir klorür oluşturur; bu bileşik, anottan uzaklaşırken koruyucu $\text{Fe}(\text{OH})_2$ katmanını tahrip ederek korozyonunun süreklilik kazanmasına neden olur. Yüzeyden biraz uzakta bulunan bu bileşik ayrışır, demir hidroksit çöker, klorür iyonları daha fazla demir taşımak için anot yüzeyine geri döner (Çakır, 2000).

Klorür iyonlarının donatıya ulaştıklarında, yukarıda açıklandığı gibi pasif tabakayı gevşettikleri, yüzeydeki kararlı tabaka ile reaksiyona girerek $\text{Fe}(\text{OH})_2\text{FeCl}_2$ gibi kararsız klorürlü bileşikler oluşturdukları sanılmaktadır. Bu tür çözünebilir bileşiklerin oluşmasında Cl^-/OH^- oranının önemli bir parametre olduğu, bu oranın 0.6 değerini aşması halinde pasif tabakada hasarın belirginleştiği ifade edilmektedir (Baradan vd., 2002; Perks, 2000). Hussain vd. tarafından değişik C_3A içeriğine sahip çimentolar kullanılarak üretilen donatılı harç çubuklarda yapılan deneysel çalışmada klorürlü ortama maruz donatılı harçlarda korozyon başlangıcının çimentonun C_3A içeriğinden etkilendiği ve C_3A içeriği arttıkça korozyon başlangıç süresinin uzadığı ifade edilmektedir. Bu çalışmada ayrıca Cl^-/OH^- oranı eşliğinin boşluk çözeltisinin alkalinitesine bağlı olduğu ve boşluk çözeltisinin pH değerinin artışı ile eşik değerinin düştüğü, pH değerinin 13.26 ile 13.36 değerleri için Cl^-/OH^- oranının 1.28 ile 2.00 arasında değiştiği ifade edilmektedir (Hussain vd., 1996).

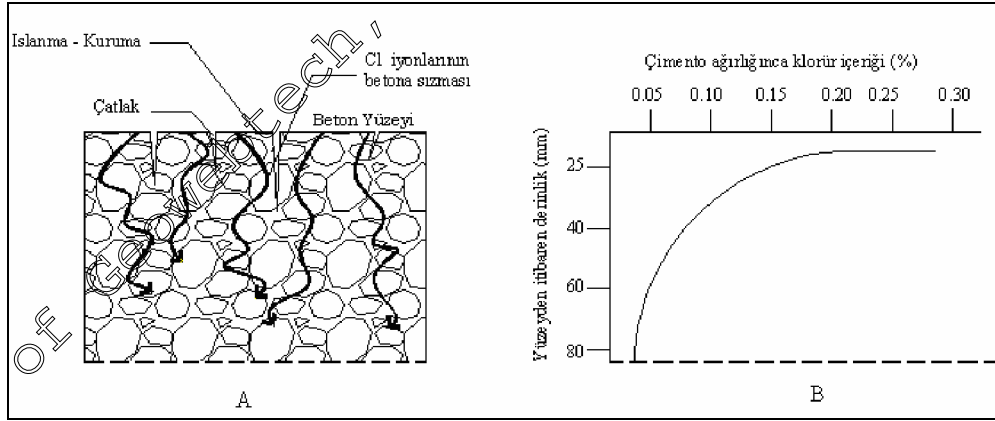
Yukarıda açıklandığı gibi klorür iyonları, metal tarafından O_2 ve OH^- iyonlarına kıyasla daha çok ve daha kolay adsorbe edilir, anodik reaksiyonun oluşmasını kolaylaştırır, demirin iyonlaşmasını hızlandırır. Özetle klorür iyonları 2.11-2.13 bağıntılar ile gösterildiği gibi katalizör görevi yapar (Baradan vd., 2002).





Şekil 2.3 Klorür iyonlarının donatıda yol açtığı oyuklanma korozyonu (Baradan vd., 2002)

Klorür iyonlarının betonarme donatıda neden olduğu oyuklanma türü korozyon reaksiyonunun gelişiminin şematik olarak gösterildiği Şekil 2.3'ten de görüleceği üzere, ortamda demir ve hidroksil iyonlarının bol miktarda bulunması nedeni ile klorür iyonları reaksiyon sonucu sürekli yenilenmekte ve donatıda tahribat devam etmektedir. Bu nedenle, klorürlerin donatıda yol açtıkları korozyonun, en tehlikeli korozyon türü olduğunu söylemek mümkündür (Baradan vd., 2002). Özellikle deniz yapılarında Cl^- iyonlarının varlığı, pH'ı düşük değerlere indirgeyerek korozyonu kolaylaştırır. Cl^- iyonları yerel, derin paslanmalara yol açabilir, bu paslanma şekline oyuklanma (pitting) korozyonu denir (Akman, 1992).



Şekil 2.4 Betona sızan klorürlerin derinlik ile değişimi (Baradan vd., 2002)

Klorürlerin beton içine taşınımı kapiler emme, su ile birlikte ilerleme ve difüzyon süreçleri ile gerçekleşir. Bu süreçlerde eleman ıslanma-kuruma etkisine maruz kalır ise süreçlerin gelişimi büyük oranda hızlanır. Yüzeyden derine inildikçe, Şekil 2.4'te görüldüğü gibi beton içinde azalan bir klorür iyon dağılımı gözlenir (Baradan vd., 2002).

Beton içindeki klorürler bağlı ve serbest halde bulunurlar. Serbest klorür betonun su ile teması halinde suya geçebilen klorürdür (Çakır, 1997). Donatı korozyonu üzerinde etkili olan da serbest klorür miktarıdır. Pratikte zararlı klor sınırları, çimento dozajının yüzdesi olarak standartlaştırılır. Sertleşmiş betondaki toplam klor nitrik asitte çözülerek, serbest klor ise suda çözülerek belirlenir. Sertleşmiş betonda, serbest haldeki yani suda çözünebilen Cl^- iyon tayini önemlidir (ACI 222R, 2001; Çakır, 1997). Çimento hamurunun klorür bağlama özelliği, Cl^- katyonunun değerliğinin ve tipinin bir fonksiyonudur. Örneğin iki değerlikli katyonlarla birleşen Cl^- 'ün difüzyon katsayısı (D_{Cl^-}), tek değerlikli katyonlarla birleşenlerden daha büyüktür ve difüzyon katsayıları sırası ile şöyledir (Hansson vd., 1985).

$$D_{Cl^-}(MgCl_2) > D_{Cl^-}(CaCl_2) > D_{Cl^-}(LiCl) > D_{Cl^-}(KCl) > D_{Cl^-}(NaCl)$$

Özellikle Mg^{+2} içeren çözeltilerin daha agresif olduğu, Cl^- iyonlarının bulunması durumunda $Mg_2(OH)_3Cl_4H_2O$ (magnezyumoksidloride) formuna dönüştüğünü (Feldman ve Cheng-yi, 1985), CSH'da yavaş erimeler olduğu (Ftikos ve Parisiakis, 1985) ve betonun toplam porozitesinin arttığı ifade edilmektedir (Moukwa, 1990; Aköz vd., 1996b; Yüzer, 1998).

Mohammed ve Hamada (2003) tarafından betonda serbest ve toplam klorür içeriği arasındaki ilişkinin değişik tipteki çimentolar için araştırıldığı deneysel çalışmada, serbest (C_f) ile toplam klorür (C_t) konsantrasyonları arasında lineer ilişki (2.14) olduğu ve ilişkideki α katsayısının 1.113 ile 1.1597 arasında değiştiği ifade edilmektedir.

$$C_t = \alpha C_f \quad (2.14)$$

Haque ve Kayyali (1995) tarafından Cl^- iyon konsantrasyonu 5000, 10.000 ve 20.000 ppm olan NaCl çözeltisi kullanılarak farklı dayanımlara sahip betonlarda serbest ve suda çözünen klorürü tespit etmek amacı ile yapılan deneysel çalışmada, klorürlerin dış kaynaklı olması durumunda klorür bağlama yeteneğine etki eden temel faktörün, betona nüfuz eden çözeltinin klorür konsantrasyonu olduğu ifade edilmiştir.

Hong ve Hooton (1999) tarafından yapılan çalışmada, klorür çözeltisi ile ıslanma-kuruma çevrimi etkisinde bırakılan beton numunelerde, emme ve difüzyon karakteristiğinin en önemli mekanizmalar olduğu, yüksek dayanımlı betonlarda kuruma süresinin uzun olmasına bağlı olarak klorür difüzyonunun etkisinin azaldığı ve bunun da yüksek dayanımlı betonların daha ince boşluk yapısından kaynaklandığı ve belirli nem içeriğini sağlamak için daha uzun kuruma zamanına ihtiyaç duymasından kaynaklandığı ifade edilmiştir. Ayrıca, ıslanma-kuruma çevrimlerinde, 3 günlük kuruma periyodunun 1 günlük kuruma periyoduna göre klorür penetrasyonunu daha fazla hızlandırdığı belirtilmiş, bu olay daha derinlere işlemiş olan

klorürün daha uzun sürede kuruması ile açıklanmıştır. Kuruyup ıslanan veya bir tarafı su ile temasta diğer taraftan havaya açık betonlarda klorür yayınması, tamamen suya batmış yapılarınkinden daha hızlı olduğu ifade edilmektedir (Çakır, 2000).

Bu olaylar dikkate alındığında, deniz yapılarında donatı korozyonunu etkileyen ana faktörün betonun nem içeriği olduğu anlaşılmaktadır, çünkü nem içeriği elektrolitin miktarını belirleyerek betonun direncini ve oksijenin beton içerisine difüzyonunu etkilemektedir. Kısmı olarak su altında kalan beton kolonlarda direnç çok değişiklik göstermektedir, örneğin kolonun üstte kalan kuru kısımlardaki direnç $1M\Omega\text{cm}$ gibi değerlere yaklaşırken, tamamen suyun içinde kalmış kısımlarda birkaç $k\Omega\text{cm}$ mertebelerinde kaldığı ifade edilmektedir (Sagües ve Pech-Canul, 2003).

2.3.3 Donatı Korozyonuna Etki Eden Faktörler

Portland çimentolu harçlarda CSH en kalıcı fazdır ve bu fazın betonu korozif etkilerden koruduğu da bilinmektedir (Kurdowski, 2004). Beton içerisine gömülü donatı yüzeyinde yüksek alkali koşullarda oluşan dirençli pasif oksit film tabakası, donatıyı korozyondan korur (Saremi ve Mahallati, 2002; Ahmad, 2003). Bazı kimyasal ve fiziksel olaylar nedeni ile beton zamanla boşluklu bir malzeme haline gelir ise, beton, koruyuculuk özelliğini yitirir, donatıyı koruyamaz, içerisindeki donatılar paslanır, işlevini yerine getiremez. Korozyon ile ilgili problemlerin önlenmesi için, korozyon mekanizmasının ve etkili faktörlerin bilinmesi gerekmektedir (Schießl and Raupach, 1997). Donatı korozyonunda, donatının içinde yer aldığı betonun özellikleri ve ortam koşulları etkilidir. Donatının korozyonunda etkili olan başlıca faktörler, betonun geçirimsizlik özelliği, karbonatlaşması, beton üretiminde puzolan malzeme kullanılması, kullanılan puzolanın türü ve miktarı, ortamda klorürlerin varlığı ve konsantrasyonu sayılabilir.

2.3.3.1 Betonun Geçirimsizliği

Sertleşmiş betonun geçirimsizliği ve su emme özelliği boşluk yapısının bir göstergesi olduğundan, geçirimsizlik betonun dayanımını, kimyasal ve fiziksel olaylara karşı dayanıklılığını etkiler. Su, çözünebilen agresif iyonları beton içerisine taşıdığı ve kimyasal hasarın kaynağı olduğu için geçirimsizlik genellikle hasar oranının bir göstergesidir (Erdoğan, 2003; Li ve Chau, 2000; Oh vd., 2002; Khan ve Lynsdale, 2002). Geçirimsizliği yüksek olan betonlarda su ve zararlı maddeler beton içerisine kolayca sızacağı için geçirimsizlik hem betonun hem de beton içerisine gömülü çeliğin hasar görmesine veya birden fazla hasarın birlikte oluşmasına neden olur (Chia, 2002). Doğal taş, harç, beton, pişmiş toprak ürünleri

gibi yapı malzemelerinde boşluklar, doğrudan veya dolaylı olarak araştırılır. Doğrudan araştırmada, malzemeden ince kesit alınarak mikroskop altında inceleme yapılır, boşlukların boyutu, boşluk oranı ölçülür, boşluk şekilleri ve sürekliliği araştırılır. Dolaylı araştırmada ise geçirimsizlik, kapiler su emme, gaz veya su buharı adsorpsiyonu gibi deneyler ile boşluk karakteri hakkında fikir edinilmeye çalışılır (Kocataşkın, 1975). Sertleşmiş betonun su emmesinde, önce büyük boyutlu boşluklar, daha sonra da küçük boyutlu kapiler boşluklar su ile dolu duruma gelmektedirler. Beton geçirimsizliği beton içerisinde su akışını gösterdiği için, geçirimsizlik ve su emme farklı özelliklerdir; ancak su emme, betonun geçirimsizliğini de etkileyen önemli bir özelliktir (Erdoğan, 2003).

Suyun ortamda buhar veya sıvı halde bulunmasına ve ortamın kuru, higroskopik yoğunlaşma ve doygun oluşuna göre suyun betondaki akışı, tüm gözenekli ortamlardaki akışkan akışı gibi tam kuru ortamda buhar akışı, yoğunlaşmanın olduğu boşluklarda sıvı ve gazın birlikte hareket ettiği kılcal geçirimsizlik ve ortamın yani boşlukların tam kuru olduğu durumdaki basınçlı geçirimsizlik olmak üzere üç farklı akışkan geçirimsizliği meydana gelir. Basınçlı su geçirimsizliği en çok sözü edilen ve somut sayısal karşılaştırma olanağı sağlayan geçirimsizlik türüdür.

L (cm) kalınlığındaki bir beton tabakasının iki yüzü arasında ΔH (cm) su sütunu değerinde basınç farkı varsa, betonu kateden suyun akış hızı dq/dt , 2.15 bağıntısındaki Darcy denklemi ile ifade edildiği gibi, suyun akış hızı cismin yüzey alanına ve cismin geçirimsizliğini ifade eden (k) permeabilite sayısına bağlı olarak belirlenir (Neville ve Brooks, 2001). Cismin boşlukları birbiriyle bağlantılı ve sıvının karakteristikleri zamanla değişmiyor ise, akışkan akışı Darcy kanununa uygun olarak gerçekleşmektedir.

$$\frac{dq}{dt} = k \frac{\Delta H \cdot A}{L} \quad (2.15)$$

Bu bağıntıdaki A, beton tabakasının alanını (cm^2), q (cm^3) betondan geçen su miktarını, t (saniye) zamanı ifade etmektedir. k, geçirimsizlik katsayısı adını alır ve birimi cm/sn 'dir. Bu formül ancak uniform laminer akım halinde geçerli olduğundan Darcy kanunu, uniform laminer akım rejiminin sağlandığı ve adsorbe edilen suyun etkisinin ihmal edilmesinin mümkün olduğu büyük boşlukları içeren cisimler için geçerlidir. Beton içinde boşluk boyutlarının küçük olması halinde adsorpsiyon olayı etkili olacağından geçirimsizlik azalacaktır (Akman, 1992; Postacıoğlu, 1986). Ayrıca, deneye ilk başlandığında rejim uniform değildir, bir süre sonra uniformluk oluşur, ancak deneye uzun süre devam edilirse su içindeki sürüntü maddeleri boşlukları tıkadığından akışın uniformluğu tekrar bozulur.

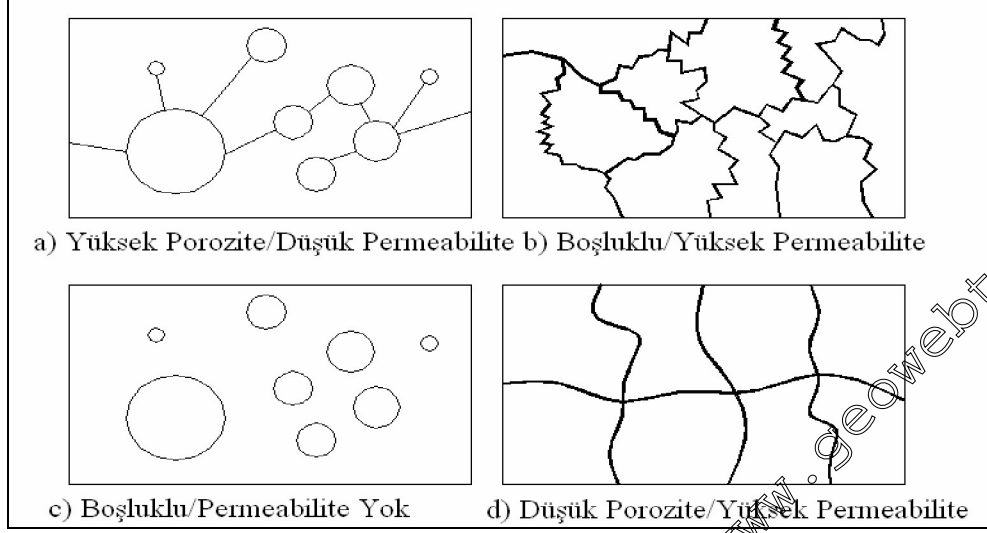
Deneylemlerle saptanan k geçirimsizlik katsayısı belirli bir zaman aralığındaki ideal bir duruma uyar ve betonun geçirimsizlik özelliğini sayısallaştıran bir malzeme sabiti olarak önemlidir; k katsayısı betonlarda 10^{-6} ile 10^{-12} cm/sn arasında değişen değerler alır. $\log(1/k)$ değerine geçirimsizlik indisi adı verilir ve bu indis de 6 ile 12 arasındadır (Akman, 1992).

Betonda sıvı geçirimsizliğinin değerlendirilmesinde yaygın olarak iki test metodu uygulanmaktadır. Bunlardan biri sabit akış metodu diğeri ise penetrasyon derinliği metodudur (Khatri ve Sirivivatnanon, 1997; Li ve Chau, 2000). Sabit akış metodu, basınçlı suyun beton içerisinden akış miktarını belirlerken, penetrasyon derinliği metodu basınçlı suyun betona işleme derinliğini belirler.

Yüksek performanslı betonların geçirimsizliği (permeabilitesi) düşük olduğundan sabit akış metodu geçirimsizlik özelliğinin değerlendirilmesinde kullanılamaz. Çünkü sabit akış metodu ile geçirimsizlik katsayısının değerlendirilmesinde, suyun, numunenin bütün boşlukları tarafından adsorblanmış olması ve boşluk yüzeylerinin suyun akış yolunda sürtünme veya kapiler etki yapmaması gerekir. Ancak bu akış koşulları düşük geçirimsizliğe sahip betonlarda, 3.5 MPa basınç altında 5000 saat dahi sağlanamamıştır. Bu nedenle düşük permeabiliteli betonların geçirimsizlik özelliği için su işleme derinliğinin belirlenmesi yöntemi geliştirilmiştir. Bu metot, düşük permeabiliteli betonların geçirimsizlik özelliğinin belirlenmesi için uygun, yüksek geçirimsizliğe sahip betonlar için uygun değildir (Khatri ve Sirivivatnanon, 1997). Yüksek performanslı betonlarda TS EN 12390-8'e (2002) uygun olarak deney örnekleri yarılp su işleme derinliği ölçülür. TS 3440'a (1982) göre, su işleme derinliğinin kuvvetli kimyasal etkilere maruz betonlar için en fazla 30mm'yi, zayıf etkide ise 50mm'yi aşmaması istenmektedir.

Betondaki boşlukların hacmini (poroziteyi) etkileyen bütün faktörler, geçirimsizliği de etkileyen faktörlerdir (Erdoğan, 2003), ancak porozite ile permeabilite her zaman birbirleri ile ilişkili değildir; örneğin çok boşluklu bir cisim geçirgen olmayabilir. Önemli olan boşlukların çapı, dağılımı, birbirleri ile bağlantısı ve dışa açık olup olmadığıdır (Baradan vd., 2002). Porozite, boşlukların iç boyutunun değişik olması, boyutların ani olarak değişmesi, boşluk iç yüzeylerinin pürüzlülüğü, dolambaçlılık gibi boşluk özellikleri geçirimsizliği etkileyen belli başlı faktörlerdir (Postacıoğlu, 1986). Betonda, genellikle geçirimsizliği belirleyen porozite değil, boşluk yapısıdır. Ayrıca matriste bulunan mikro çatlaklar geçirimsizliği önemli oranda artırır. Porozite ile geçirimsizlik arasındaki farkın şematik olarak gösterildiği Şekil 2.5'te, boşluk sistemindeki bağlantının geçirimsizlik için ön koşul olduğu

açıktır (Chia ve Zhang, 2002). Örneğin, boşluklar süreksiz ise betonun porozitesi yüksek olsa bile geçirimsizliği düşük olmaktadır (Kearsley ve Wainwright, 2001).



Şekil 2.5 Porozite ve permeabilite arasındaki farkın şematik gösterimi (Chia ve Zhang, 2002)

Beton yapımında kullanılan çimentonun türü, geçirimsizlik üzerinde etkilidir. Çimentonun karma oksitlerinden C_3S 'de açığa çıkan $Ca(OH)_2$, C_2S 'de açığa çıkanın iki katıdır. Buradan iki önemli sonuç çıkar. $Ca(OH)_2$, su içinde çözünür, yeri boş kalır ve betonun mukavemeti düşer. Su, beton içine kolaylıkla girer ve hasara yol açar. Bu durumda C_3S 'i fazla çimento ile üretilen betonları su yapılarında kullanmak doğru olmaz. Ayrıca C_3A içeriği yüksek çimentoların Mg^{++} içeren zararlı sulara maruz betonda kullanılması ile ortamdaki Mg^{++} iyonunun Ca^{++} iyonu ile yer değiştirme niteliğine bağlı olarak esas yapıyı oluşturan kalsiyum silikatlar çözünür, betonun geçirimsizliği artar. Kimyasal etkilere dayanıklı çimento seçiminde $Ca(OH)_2$ 'nin ve C_3A 'nın çok veya az oluşu hususları dikkate alınmalıdır (Akman, 1987).

Aköz vd. (1996b) tarafından silis dumanı katkılı ve katkısız harçlara sodyum klorür ve magnezyum klorürün etkisinin araştırıldığı deneysel çalışmada, magnezyum klorürün sodyum klorürden daha etkili olduğu, bunun sebebinin iki değerlikli Mg^{+2} katyonu ile birleşen Cl^- difüzyonunun tek değerlikli Na^+ katyonu ile birleşen Cl^- difüzyonundan daha yüksek olmasına bağlanabileceği ve boşluklarda $Mg_2(OH)_3Cl_4H_2O$ tuzunun oluşması ve/veya CSH'daki bozulmalar sonucu toplam porozitenin artmasının da $MgCl_2$ 'ün olumsuz etkisini arttırabileceği ifade edilmektedir.

Betonun geçirimsizliğinde çimentonun kimyasal bileşiminden başka inceliği, dozajı, su oranı ve betonun kürü çok önemlidir. Örneğin aynı s/ç oranı için, kaba çimentolar ince çimentolara

kıyasla daha geçirgen yapı oluşturmaktadır. Diğer değişkenlerin aynı tutulması halinde, yüksek çimento dozajı veya düşük su/çimento oranının geçirimsizliği azalttığı bilinmektedir. Çimento hamurunda su/çimento oranının 0.3'ten 0.7'ye çıkarılması durumunda hamurun permeabilitesi 100 kat artmaktadır. Örneğin, su/çimento oranı 0.4 değerini aştığında, kapiler boşluklar arasındaki bağlantıların kesilmediği ve geçirimsizliğin hızla arttığı görülmektedir (Baradan vd., 2002). Özetle, karma suyunun fazlalığı çimento hamuru fazının geçirimsizliğini etkileyen en önemli faktördür; fazla su, buharlaşabilen suyu içeren boşluk sistemini belirler. Suyun kaybolması ve boşluğun oluşması sadece buharlaşmaya bağlı değildir, bu olguda hidrasyon da etkindir; ilerleyen hidrasyon aynı zamanda boşlukları doldurarak kapillariteyi dolayısı ile geçirimsizliği azaltır (Akman, 1989; Dongxue vd., 1997). Su/çimento oranı çok düşük ise, iyi yerleşmeyen betonda büyük ve birbirine ile bağlantılı boşluklar oluşur, geçirimsizlik artar. (Akman, 1987). Çimento hamuruna agrega taneleri katıldıkça geçirimsizliğin arttığı gözlenir. Bu artışın nedeni, agrega-çimento hamuru arayüzünde oluşan mikro çatlaklardır. Agregaların geçirimsizliği önemli değildir hatta iyi bir agrega-hamur bağlantısı için agregaların bir miktar boşluk içermesi iyidir (Akman, 1989). Diğer koşulların aynı kalması ve aynı çimentonun kullanılması halinde agreganın türüne bağlı olarak betonun geçirimsizliği değişir. Agreganın geçirimsiz olması, akım alanını azaltır. Akım yollarının agrega çevresinden geçip uzaması nedeniyle betonun geçirimsizliği azalır (Baradan vd., 2002). Betonun porozitesi ve geçirimsizliği betonun nem içeriğinden çok fazla etkilenmektedir. Doygun ve etüv kurusu koşullardaki fark yaklaşık 2 kattır, bu nedenle deney koşulları açıkça tanımlanmalıdır. Numune, havada sabit bağıl nemde 28 gün tutulsa bile beton içerisinde üniform nem dağılımı elde edilememektedir. Kurutmanın da tam olarak yapılamamış olması nedeni ile boşluk sisteminde özellikle küçük boşluklarda su bulunabilmektedir. Küçük boşluklarda kalan su, akışı etkileyebilmektedir. Ayrıca 105 °C de tam kurutma uygulandığında rötre çatlakları oluşmakta, bu çatlaklar, boşluk yapısını değiştirmekte, porozite ve geçirimsizlik değerleri yapay olarak artmaktadır (Kearsley ve Wainwright, 2001).

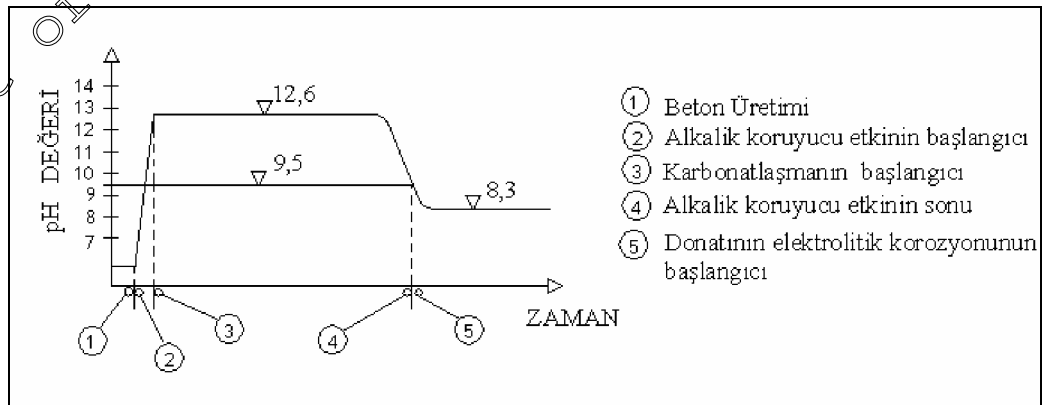
Torii ve Kawamura (1992) tarafından yapılan deneysel çalışmada, donatının, klorüre bağlı korozyonun azaltılmasında betonda mineral katkı olarak kullanılan yüksek fırın cürufu, uçucu kül veya silis dumanının önemli bir rol oynadığı ve bu mineral katkıların daha ince ve süresiz boşluk yapısı oluşturdukları ifade edilmektedir. Bu çalışmada, mineral katkı içeren betonların difüzyon ve permeabilitesinin, normal portland çimentosu ile üretilen betonlarla kıyaslandığında, kür ve çevresel koşullara karşı daha hassas olduğu ve kullanılan mineral katkıların düşük klor permeabilitesi sağlamada etkili olduğunun görüldüğü ifade edilmektedir.

Hızlandırılmış klorür permeabilite sonucuna göre; kür ve çevre koşullarından bağımsız olarak normal Portland çimentosu ile üretilen betonların yüzey tabakası ve iç kısımları, mineral katkı içeren betonlara kıyasla daha geçirimlidir. Torii ve Kawamura'nın bu çalışmasında kullanılan tüm mineral katkıların özellikle geç yaşlarda, düşük klorür permeabiliteli beton üretiminde etkili olduğu, klorür permeabilite deney sonuçlarına göre; normal Portland çimentosu ile üretilen betonlardan geçen coulomb değerinin, su/çimento oranının artması ile arttığı, başlangıç kür süresinin artması ile azaldığı ifade edilmektedir.

Philipose vd. (1992) tarafından yapılan deneysel çalışmada, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı içeren betonlardaki klorür penetrasyonunun, normal betonlara kıyasla daha az olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca düşük su/çimento oranı ile üretilen yüksek fırın cürufu ve silis dumanlı katkılı betonlarda boşluk boyutunun daha düşük ve boşluk dağılımının daha iyi olması nedeni ile betonun kimyasal etkilere karşı daha yüksek direnç gösterdiği ifade edilmektedir.

2.3.3.2 Karbonatlaşma

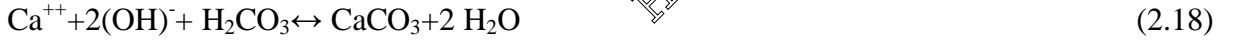
Karbonatlaşma, çimento pastasının alkali bileşenleri ile atmosferdeki karbondioksit (CO_2) gazı arasında meydana gelen reaksiyon sonucunda betonun nötrale olması olayıdır (ACI 222R, 2001). Betonun 12-13 değerinde olan pH derecesini düşüren ve donatının paslanmasına yol açan bu olay, betonarme elemanların servis ömürlerini belirleyen önemli faktörlerden birisi olarak kabul edilmektedir (Baradan vd., 2002). Betonun alkalitesi, büyük ölçüde, çimentonun hidrasyonundan kaynaklanan ve gözenek suyu içindeki çözülmüş kalsiyum hidroksit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tarafından sağlanır (Philipose vd., 1992; Neville ve Brooks, 2001). Şekil 2.6'da görüldüğü üzere beton üretimini takip eden süreç ile başlayan yüksek alkali etkisi, karbonatlaşma olayı ile zaman içinde yok olabilir.



Şekil 2.6 Beton örtü tabakasında pH-zaman ilişkisi (Baradan vd., 2002)

Karbonatlaşma olayında, havanın karbondioksiti, karbonatlaşmamış bölgedeki boşluk suyunda çözünür, bikarbonata dönüşür (2.16). Bu reaksiyon için ince bir su filmi ve devamlı CO₂ akımı gerektiğinden bağıl hava nemi %30'un altındaki değerinde CO₂ gazı karbonik asite dönüşmez, dolayısı ile karbonatlaşma meydana gelmez. Havanın bağıl neminin %60 olması, karbonatlaşmanın oluşabileceği en uygun ortamdır. Nemin %90'ın üzerinde olması durumunda karbonatlaşma reaksiyonu pratik olarak durur. Suyu doymuş bir betona CO₂ difüzyonu ihmal edilebilir mertebelere kadar ve karbonatlaşma olmaz (Baradan vd., 2002; Yüzer, 1998).

Boşluk suyunda çözünen bir diğer madde Ca(OH)₂'dir (2.17), ayrılan Ca(OH)₂ karbonik asit (H₂CO₃) ile reaksiyona girerek kararlı haldeki CaCO₃'a ve suya (2.18, 2.19) dönüşür (Yüzer, 1998; Pereira, 2003). Karbonatlaşmadan önce ortamın 12.6 olan pH değeri, karbonatlaşmadan sonra 8.3'e kadar düşer (Şekil 2.5).



Doğal koşullarda şehirlerdeki havada CO₂ oranı %0.03 iken endüstriyel bölgelerde normalin 10-100 kat fazlasına rastlanmaktadır (ACI 222R, 2001; Yüzer, 1998; Neville, 1990). Karbonatlaşma reaksiyonunun kendisi betonun bozulmasına yol açmaz ancak betonun iç yapısında meydana getirdiği değişiklikler nedeniyle önemli sonuçlar doğurur. Karbonatlaşma, beton yüzeyinden iç bölgelere doğru hızı azalarak devam eder. Betonun iç bölgelerine doğru CO₂ girişinin zorlaşması da reaksiyonun yavaşlamasının bir diğer nedenidir (Baradan vd., 2002). Yapılan çalışmalar mineral katkılı betonların karbonatlaşma derinliğinin normal Portland çimentolu betonlara kıyasla daha fazla olduğunu göstermektedir (Torii ve Kawamura, 1992; Tomisawa vd., 1992; Nakamoto ve Togowa, 1995; Sakai vd., 1992; Dongxue vd., 1997).

Tomisawa vd. (1992) tarafından gerçekleştirilen hızlandırılmış karbonatlaşma testine göre, cüruf katkılı betonların karbonatlaşma derinliğinin normal Portland çimentolu betonlardan daha yüksek olduğu ifade edilmektedir. Sakai vd. (1992) tarafından inceliği 300 m²/kg ile 600 m²/kg olan yüksek fırın cürufunun çimentoya %50 ile %80 arasında katılmasıyla yapılan diğer bir çalışmada ise, cüruf içeriğindeki artışa bağlı olarak karbonatlaşma derinliğinin arttığı, yüksek oranda cüruf içeren betonarme yapı betonlarında karbonatlaşmanın etkisini azaltacak

önlemler alınması gerektiği ve yeterli pas payı bırakılarak karbonatlaşmanın yaratacağı problemin engellenmesi gerektiği ifade edilmektedir. Nakamoto ve Togawa (1995) tarafından yapılan deneysel çalışmada da cüruf içeriğinin artması ile karbonatlaşma derinliğinin özellikle yüksek su/çimento oranlarında arttığı ifade edilmektedir. Torii ve Kawamura (1992) tarafından cüruf katkılı, havada ve suda kür uygulanan betonların karbonatlaşma derinliklerinin incelendiği deneysel çalışmada, kuru ortamda kür uygulanan betonların karbonatlaşma derinliği 12 mm iken aynı sürede suda kür edilen betonların çok az karbonatlaşma gösterdikleri ifade edilmektedir. Ayrıca cüruf katkılı betonların karbonatlaşma derinliğinin, normal Portland çimentolu betonlarda olduğu gibi yaşın karekökü ile orantılı olduğu ve cüruf içeriğinin %70'leri aştığı durumlarda, karbonatlaşmanın daha hızlı artış gösterdiği ifade edilmektedir.

Karbonatlaşma sonucunda sertleşmiş çimento hamuru büzülme göstermekte dolayısı ile betonda çatlaklar oluşmaktadır, ancak karbonatlaşmanın betona olumlu etkileri de vardır. Bunlar; karbonatlaşma olayı sonunda bir miktar suyun serbest kalması ve bu suyun çimentonun hidrasyonuna yardımcı olması ile beton dayanımında çok az da olsa bir artış meydana getirmesi ve oluşan CaCO_3 kristallerinin, çimento hamurundaki kapiler boşluklara yerleşmesi ile betonu nispeten daha geçirimsiz hale getirmeleridir (Erdoğan, 2003). Dongxue vd. (1997) tarafından yapılan çalışmada, bu görüşü doğrular niteliktedir. Bu çalışmada, karbonatlaşma sonucu oluşan CaCO_3 'ün boşlukları doldurarak yoğunluk ve dayanım artışı sağladığı ve özellikle cüruf katkılı betonların dayanımının karbonatlaşmadan sonra artabileceği, rötre çatlaklarının neden olduğu dayanım kaybını telafi edebileceği ifade edilmiştir. Ancak olumlu ve olumsuz özellikleri karşılaştırıldığında, karbonatlaşma, özellikle betonarme betonlarda donatının korozyonuna neden olduğundan istenen bir durum değildir. Çünkü, kalsiyum hidroksitinin çözünmesi ile betonun alkalinitesi düşük düzeye inmekte, alkalitenin azalması ile, Şekil 2.5'te görüldüğü gibi betonda karbonatlaşmanın olduğu bölgelerdeki betonarme demirlerinin korozyonu daha hızlı olabilmektedir (Erdoğan, 2003; Neville, 1990; Baradan vd., 2002). Ayrıca pas payının yetersiz oluşu, çatlakların varlığı ve düşük çimento içeriği ile yüksek su/çimento oranı da karbonatlaşmaya bağlı korozyon gelişiminde önemli faktörlerdir (ACI 222R, 2001; Neville, 1990).

Torii ve Kawamura (1992) tarafından yapılan deneysel çalışmada, normal Portland çimentosu ile üretilen ve yüksek karbonatlaşma derinliğine sahip betonların, düşük klorür geçirimsizliği gösterdiği, bu durumun, karbonatlaşmanın sonucunda boşlukların bloklanması ve klorür geçirimsizliğinin buna bağlı olarak azalması olarak açıklanabileceği, yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı katkılı betonların, havada kür edilseler bile, klorür penetrasyonunu

azaltmada çok etkili oldukları, puzolanik reaksiyonun kuru ortamda bile devam ettiği, çimento pastasının ve çimento pastası-agrega arayüz geçiş bölgesinin daha yoğun olmasını sağladığı ifade edilmektedir.

Karbonatlaşma derinliği, beton kesitine fenolfitalein çözeltisi püskürtülerek araştırılır. Beton kesitinde karbonatlaşmayan bölge fenolfitalein ile reaksiyona girer ve pembe renk alır; rengi değişmeyen kısım ise karbonatlaşmış bölgeyi gösterir (Erdoğan, 2003; Postacıoğlu, 1986; Baradan vd., 2002; Yüzer, 1998; Neville 1990).

2.3.3.3 Puzolan Malzeme Kullanımı

Donatıyı korozyondan korumanın en etkili yolu, donatının yeterli kalınlıkta, geçirimsiz beton ile kapatılmasıdır. Betonda geçirimsizliğin sağlanması için yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı gibi mineral katkıların puzolanik reaksiyonları sonucu, daha küçük ve süreksiz boşluk yapısı oluşturduğu, mineral katkı içeren betonların klorür difüzyonunun ve permeabilitesinin daha düşük olduğu bilinmekte (Bagel, 1998), ancak katkılı betonların kür koşullarına ve çevresel etkilere karşı, normal portland çimentosu ile üretilen betonlara göre çok daha hassas olduklarına dikkat çekilmektedir (Torii ve Kawamura, 1992). Torii ve Kawamura (1992) tarafından yapılan deneysel çalışmada, donatının, klorüre bağlı korozyonun azaltılmasında betonda mineral katkı olarak kullanılan yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanının önemli bir rol oynadığı ve bu mineral katkıların daha ince ve süreksiz boşluk yapısı oluşturdukları ifade edilmektedir. Hızlandırılmış klorür geçirimsizliği deney sonuçlarına göre; kür ve çevre koşullarından bağımsız olarak normal Portland çimentosu ile üretilen betonların yüzey tabakası ve iç kısımları, erken yaşlarda mineral katkı içeren betonlara kıyasla daha geçirimli, geç yaşlarda ise daha geçirimsizdir; normal Portland çimentosu ile üretilen betonların geçirimsizliğinin su/çimento oranının artması ile arttığı, başlangıç kür süresinin uzaması ile azaldığı ifade edilmektedir.

Fukuda ve vd. (1992) tarafından yapılan deneysel çalışmada betona cüruf katılması ile çapı 10^{-3} nm aralığında olan boşlukların oranının belirgin bir şekilde düştüğü ifade edilmektedir.

Brylicki vd. (1992) de cüruf miktarının artması ile hidrate kalsiyum alüminat ve portlandit miktarının azaldığı, bu hidrate elemanların neden olduğu genleşmeler azaldığı için mikro yapıda mikro çatlaklar oluşmadığı, boşluk oranının ve mikro çatlakların azalması sonucu klorür difüzyon derinliğinin azaldığı ve sonuç olarak klorürlerin yol açtığı korozyonun önlendiği ifade edilmektedir.

Gao vd. (2005) tarafından katkısız ve inceliği $425 \text{ m}^2/\text{kg}$ ve $600 \text{ m}^2/\text{kg}$ olan ve ağırlıkça %20, %40 ve %60 oranlarında yüksek fırın cürufu katkılı betonların arayüz geçiş bölgesinin XRD ve SEM ile incelendiği iç yapı analizlerinde, çimentonun ve cürufun kendi başlarına ayrı ayrı $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ürettiği, doymuş $\text{Ca}(\text{OH})_2$ çözeltisinde yüksek fırın cürufunun puzolanik reaksiyonu sırasında $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tükettiği ve bu neden ile $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kristallerinin miktarının, doymuş $\text{Ca}(\text{OH})_2$ çözeltisindeki cürufun yapısına ve reaksiyon hızına bağlı olduğu ifade edilmektedir.

Otsuki vd. (1992) tarafından yapılan deneysel çalışmada, inceliği $3980 \text{ cm}^2/\text{g}$ olan ve normal Portland çimentosuna %50 oranında yerdeştirmeli olarak katılan yüksek fırın cürufunun, korozyon ve klorür penetrasyonuna karşı permeabiliteyi iyileştirerek harcın direncini arttırdığı, yüksek fırın cürufunun, beton içine gömülü çeliğin korozyonunu engellemede ve harcın klorür iyon geçirimsizliğini azaltmada etkili olduğu belirtilmiştir. Yüksek fırın cürufu katkılı harçlarda klorür difüzyon katsayısı $2.5 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{sn}$ iken, katkısızlarda $8.5 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{sn}$ olduğu, yüzeydeki ağırlıkça Cl^- içerikleri incelendiğinde, yüksek fırın cürufu katkılılarda toplam bağlayıcının yüzdesi olarak ağırlıkça %1 iken katkısızlarda %0.8 mertebelerinde olduğu ifade edilmiştir.

Polder ve Peelen (2002) tarafından yapılan deneysel çalışmada, orta ve yüksek oranlarda cüruf içeren betonların, normal Portland çimento betonlara kıyasla, buz çözücü tuzların etkisi altında daha az klorür penetrasyonu, daha düşük korozyon olasılıkları ve daha yüksek elektriksel direnç gösterdikleri ifade edilmektedir.

Hinczak ve Cao (1992) tarafından yapılan deneysel çalışmada, cürüflü çimentolardaki cüruf içeriğinin, kullanılan Portland çimentosu tipinden daha önemli olduğu, deniz suyu etkisinde, betonların dayanım ve kalıcılık performansını etkileyen ana faktörün bağlayıcı miktarı ve cüruf içeriği olduğu ifade edilmiştir. Cürüflü çimentonun, sertleşmiş çimento pastasında daha küçük boşluk oluşturduğu ve düşük $\text{Ca}(\text{OH})_2$ içeriği sağlayarak beton yapıların kalıcılığını arttırdığı ifade edilmektedir. Bu çalışmada, deniz suyu etkisine maruz bırakılmadan önce başlangıç kürü süresi uzun tutulan cüruf çimento betonların klorür iyon penetrasyonuna daha fazla dayanıklı olacaklarının beklendiği ifade edilmektedir. Cürüflü çimentolar ile üretilen betonlarda, 0-10 mm' lik bölgedeki klorür iyon konsantrasyonu %60 ve daha az cüruf içerenlerde, normal Portland çimento betonlara göre daha fazladır. Ancak %80 ve %90 cüruf katkılı betonlarda tam tersine klorür iyon konsantrasyonu daha düşüktür. Ancak cüruf kullanımının faydalı etkisi 20-30 ve 40-50 mm' lik bölgelerde görülmektedir, örneğin %60 cüruf içeren betonların bu bölgelerdeki klorür içeriği, 3 yıl deniz suyunda kaldıktan sonra, 20-30 mm de %1'den az ve 40-50 mm' de ise yok denecek kadar azdır ve bu

özelliğın bağılayıcı madde miktarı 280 kg/m^3 olan betonlarda bile geçerli olduğu ifade edilmektedir. Bu çalışmada ayrıca klorür iyon profiline göre; %60 cürüflü 280 kg/m^3 dozlu cürüflü çimentoda, donatı korozyonu bakımından 550 kg/m^3 lük normal Portland çimentolu betonla eşit veya daha iyi koruma sağladığı, bu durumun 20 mm' lik pas payı sağlanmış betonlarda geçerli olduğu yine ifade edilmektedir.

Fukudome vd. (1992) tarafından yapılan deneysel çalışmada da, yüksek fırın cürufu içeren betonların yüzeyindeki klorür miktarının, normal Portland çimentosu ile üretilen betonlarınkinden daha fazla olduğu, ancak cüruf katkılı betonların difüzyon katsayısının, normal Portland çimentolu betonlarınkinden daha küçük olduğu ifade edilmektedir. Bu çalışmada, normal portland çimentolu betonların yüzeyindeki klorür konsantrasyonu ağırlıkça %0.56 iken %30 cüruf katkılı betonlarda %1, %50 cüruf katkılı betonlarda %1.03 olduğu ifade edilmektedir. Ancak etkili difüzyon katsayısının normal Portland çimentolu numunelerde $0.94 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{gün}$, %30 cüruf katkılı betonlarda $0.61 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{gün}$ ve %50 cüruf katkılı betonlarda $0.31 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{gün}$ olduğu belirtilmektedir. Bu çalışmada ayrıca etkili klor difüzyon katsayısının, cüruf ilavesi ile düştüğü, ancak cürufun inceliğinin etkili klor difüzyon katsayısını azaltmada az etkili olduğu ve betonun klorür difüzyonunun boşluk yapısı ile yakından ilgili olduğu ifade edilmektedir.

Al-Amoudi vd. (1992) tarafından yapılan deneysel çalışmadaki, korozyon ölçümlerine göre, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı katkılı betonların, uçucu küllü ve yalın betonlara göre, yüksek klorür ve sülfatlı ortamlarda donatı korozyonunu geciktirmede daha üstün oldukları, yüzey hasarı ve dayanımdaki kabul edilebilir kayba rağmen cüruf ve silis dumanlı numunelerin donatı korozyonunun hızını azaltması bakımından uçucu küllü ve yalın betonlardan oldukça iyi oldukları ifade edilmektedir. Örneğın uçucu kül, cüruf ve silis dumanı katkılı betonların korozyon hızının, yalın betona kıyasla sırası ile 2.5, 10.5 ve 28 kat daha az olduğu ve yüksek klorür ve sülfat etkisinde kalan harmanlanmış çimentolar ile üretilen betonlardaki yüzey hasarının donatı korozyonunu hızlandıran bir faktör olmadığı ifade edilmektedir. Ayrıca, harç numunelerde gözlenen hasarın büyük olasılıkla harcın boyutları ile ilgili olduğu, gerçek yapılarda sülfat iyonlarından kaynaklanan dayanım kaybının laboratuvar numunelerindeki kadar yüksek olmayabileceği ifade edilmektedir. Arap körfezinde 2 yıl boyunca ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılan beton numunelerden, cüruf katkılıların yüzeyde yüksek olan klorür konsantrasyonunun, 10 mm derinlikte keskin bir şekilde azaldığı, yalın betonlarda ise 10 mm derinlikte konsantrasyonun 3-5 kat daha fazla olduğu ifade edilmektedir. Ayrıca yüksek fırın cürufu ile üretilmiş betonarme elemanlarda korozyon hızının, normal beton ile üretilmiş betonarme elemanlardaki korozyon hızından yaklaşık 10.5

kat daha yavaş olduğu da ifade edilmektedir. Bu çalışmadaki deney sonuçlarına göre, yüzey hasarı ve dayanımdaki kayıp, cüruf ve silis dumanı katkılı numunelerde daha fazla, donatının korozyonu ise daha azdır.

Luo vd. (2003) tarafından yüksek fırın cürufu katkılı betonların klorür bağlama özelliği ve difüzyonunu araştırmak amacı ile yapılan deneysel çalışmada inceliği $4650 \text{ cm}^2/\text{g}$ olan cüruf kullanılarak üretilen harçlarda 0-10 mm, 10-20 mm, 20-30 mm, 30-40 mm ve 40-50 mm gibi 5 değişik derinlikte toplam ve serbest klorür miktarları araştırılmış ve toplam klorür difüzyon katsayısı ve serbest klorür difüzyon katsayısı belirlenmiştir. Buna göre, normal Portland çimentolu betonlarda yüksek fırın cürufu kullanılması ile boşluk yapısında iyileşme görüldüğü ve klorür difüzyon katsayısının büyük ölçüde düştüğü, klorürlerin içerden veya dışardan girişinden bağımsız olarak, cürufun klorür bağlama kapasitesinin büyük ölçüde arttığı da belirtilmiştir.

Geiseler vd. (1995) tarafından yüksek fırın cürufu çimentoların beton yapılarda kalıcılığa etkilerinin araştırıldığı deneysel çalışmada, cüruf kullanımı ile çimento pastası yoğunluğunun arttığı, çimentodaki cüruf oranının artışı ile betonlarda klorür penetrasyonuna karşı gösterilen direncin de arttığı ifade edilmektedir. Bunun anlamı, klorüre bağlı korozyon tehlikesinin bulunduğu durumlarda cüruf çimento kullanılarak riskin ciddi şekilde azaltılabileceğidir. Klorürlerin betonarme elemana nüfuz ettiği bu durumda ise önemli olan hangi miktarda klorürün çimento pastası tarafından bağlanacağıdır, çünkü bağlı olan klorürler korozyon açısından etkisiz durumdadır.

Pal vd. (2002) tarafından cüruf katkılı betonların donatının korozyon davranışına etkilerinin araştırıldığı deneysel çalışmada, inceliği $382 \text{ kg}/\text{m}^2$ ve $427 \text{ kg}/\text{m}^2$ olan cüruf, ağırlıkça %30, %50 ve %70 oranlarında kullanılmış, özellikle yüksek oranda cürufun çimento ile yer değiştirmesi ile aynı basınç dayanımına sahip betonlarda korozyon oluşumunda belirgin bir düşüş meydana geldiği ifade edilmektedir. Hızlandırılmış elektrolitik korozyon ölçümlerinde cüruf oranı %0'dan %70 kadar arttırıldığında korozyon başlangıç süresi 15 dakikadan 240 dakikaya çıkmıştır.

Yeau ve Kim (2005) tarafından inceliği $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ olan ve farklı oranlarda yüksek fırın cürufu içeren betonların korozyon direncini araştırmak üzere yapılan deneysel çalışmada, klorür difüzyon katsayısının cüruf miktarı ve kür süresinin artışı ile azaldığı ifade edilmektedir. Cüruf katılmayan ve 28 gün suda kür edildikten sonra hızlandırılmış korozyon testi uygulanan numunelerde yaklaşık $2.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ değerinde olan klorür difüzyon katsayısı, ağırlıkça %25 cüruf katılanlarda $1.4 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$, %40 cüruf katılanlarda 1.3×10^{-8}

cm^2/s , %55 cüruf katılanlarda $1.2 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ değerindedir. Kür süresi 56 güne çıktığında ise klorür difüzyon katsayısı cüruf katkısızlarda $1.4 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ değerinde iken %55 cüruf katkılılarda $0.5 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ değerindedir. Bu çalışmaya göre cüruf oranı ve betonun yaşı arttıkça klorür difüzyon katsayısı düşmektedir.

2.3.3.4 Klorürlerin Varlığı, Klorür Korozyonu

Betonarme donatısında klorür korozyonu başlığı altında da açıklandığı gibi, klorürler betonun donatı etrafında oluşturduğu pasif tabakanın çözünmesine yol açarak donatının korozyonuna neden olur ve olayı hızlandırır. Bu nedenle donatının korozyondan korunması için geçirimsiz beton üretilerek klorürlerin donatıya ulaşması engellenmelidir.

Betonarme elemanlarda, klorür iyonlarının dışarıdan veya herhangi bir nedenle betona karışması sonucu içeriden etki etmesi, betonun karbonatlaşması ve pH'ın düşmesi nedeni ile, betonun donatıyı korozyondan koruma özelliği kaybolabilir. Klorür etkisindeki yapılarda, çimentodaki cüruf, uçucu kül, silis dumanı gibi puzolan malzemeler, yukarıda etraflıca açıklandığı gibi klorürlerin beton içerisine girişini yavaşlatarak korozyonu önlemekte veya geciktirmektedir. Teorik ve deneysel çalışmalara göre, betonun elektriksel direnci ile klorür girişi ilişkilidir; genel olarak, betonun klorür difüzyon katsayısı beton direnci ile ters orantılıdır, geçirimli bölgelerin direnci daha az, klorür penetrasyonu daha yüksektir. Depasivasyondan sonra, betonun direnci ve donatının korozyon oranı birbiri ile ilişkilidir, çelik donatı yüzeyindeki anot ve katot arasındaki iyon transferi bu oranı kontrol eden faktörlerden biridir. Örneğin aynı doygunluk derecesi için, cüruf ve uçucu külün betonun elektriksel direncini arttırdığı bilinmektedir. Polder ve Peelen (2002) tarafından yapılan deneysel çalışmada orta ve yüksek seviyede cüruf içeren betonların, buz çözücü tuzların etkisindeki klorür penetrasyonunun normal Portland çimentolu betonlara kıyasla daha az olduğu, korozyon olasılığının daha düşük ve elektriksel direncin daha yüksek olduğu ifade edilmektedir. Khalil (2002) tarafından yapılan deneysel çalışmada da yüksek fırın cürufu içeren betonların klorür difüzyon katsayısının normal Portland çimentolu betonlardan belirgin bir şekilde düşük olduğu ifade edilmektedir.

Çakır (2000), beton içerisinde farklı derinliklerde birden fazla donatı çeliği olması durumunda, klorür iyonlarının ilk önce yüzeye yakın olan donatıları aktive edeceğini, bu donatıların anot olarak davranacağını, alttaki donatıların yoğun klorür saldırısına maruz kalıncaya dek onları katodik olarak koruyacağını ifade etmektedir.

Klorürlerin donatıya zararlı etkisi nedeni ile Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) ve Türk Standartlar Enstitüsü (TSE) tarafından, yapı türü ve kullanılan betonun bulunduğu ortam koşulları dikkate alınarak çimentoda bulunabilecek klorür miktarlarına Çizelge 2.1 ve 2.2’de verilen sınırlamalar getirilmiştir.

Çizelge 2.1 Betonun klorür içeriğinin ACI 222R-01’e (2001) göre sınırlandırılması

| Yapı Türü ve Bulunduğu Ortam | Asitte Çözünen Klorür (%) | Suda Çözünen Klorür (%) |
|------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Öngerilmeli Beton | 0.08 | 0.06 |
| Betonarme (Islak Ortamda) | 0.10 | 0.08 |
| Betonarme (Kuru Ortamda) | 0.20 | 0.15 |

Çizelge 2.2 Betondaki klorür içeriğinin TS EN206-1’e (2002) göre sınırlandırılması

| Kullanılan Beton | Klorür içeriği sınıfı* | Çimento** kütlesine göre en fazla Cl (%) |
|---|------------------------|--|
| Korozyona dayanıklı kaldırma parçaları hariç, çelik donatı ve diğer gömülü metal ihtiva etmeyen | Cl 1.0 | 1.0 |
| Çelik donatı ve diğer gömülü metal ihtiva eden | Cl 0.20 | 0.2 |
| | Cl 0.40 | 0.4 |
| Çelik öngerilme donatısı ihtiva eden | Cl 0.10 | 0.1 |
| | Cl 0.20 | 0.2 |

*: Özel kullanım amaçlı betonlarda uygulanacak sınıf, betonun kullanılacağı yerde geçerli kurallara bağlıdır.

** : Mineral katkıların kullanıldığı ve katkının çimentoya dahil olarak kabul edildiği yerlerde, klorür içeriği, klorür iyonlarının, çimento ve dikkate alınan katkı miktarlarına oranlanması ile hesaplanır

ACI 222R-01 standardına (2001) göre, kuru ortamda bulunan betonarme elemanlarda suda çözünen klorür miktarının sınır değeri %0.15 iken, ıslak ortamda bulunan betonarme elemanlarda ve öngerilmeli betonlarda sırası ile %0.08 ve %0.06 mertebelerine düşürülmektedir. Ülkemizde yürürlükte olan TS EN206-1 (2002) standardında da çimento kütlesine göre klorür içerik sınıfları tanımlanmıştır. Bu standarda göre, çelik donatı ve diğer gömülü metal içeren betonlar, Cl 0.20 ve Cl 0.40 olarak iki sınıfa ayrılmış, klorür içerikleri %0.2 ve %0.40 ile sınırlandırılmıştır.

Win vd. (2004) tarafından çatlaklı betonarme betonundaki klorür iyon penetrasyon profilinin araştırıldığı deneysel çalışmada, 20 °C sıcaklıktaki NaCl çözeltisi içinde saklanan numunelerde çatlağa bağlı olarak klorür iyonlarının hızlı bir şekilde penetre olarak donatıya ulaştığı ve çelik civarında penetrasyon meydana geldiği, ancak 0.25 gibi düşük su/çimento

oranına sahip numunelerin 0.45 ve 0.65 gibi daha yüksek su/çimento oranındaki betonlara kıyasla daha düşük konsantrasyon profiline sahip olduğunu ifade edilmiştir.

Çok bileşenli, mikro boşluklu ve mikro yapı bakımından hassas olan çimento esaslı malzemelerde akışkan akışı ve iyon transferi meydana gelir (Yang ve Cho, 2003). Bu özellik nedeni ile deniz etkilerine maruz veya buz çözücü tuzlar ile temas halinde olan beton yapılarda artan oranlarda hasarlar görülmüş, dikkatler, beton örtüde meydana gelen klorür penetrasyon hızına çevrilmiştir (Andrade vd., 1997). Betonarme yapılarda ise deniz suyu ve buz çözücü tuzların beton ile teması halinde, klorürler donatı korozyonunu başlatarak betonda genleşmelere neden olmakta ve zamanla betonda hasar oluşturmaktadır (Jensen vd., 1999; Zhang vd., 1998). Boşluklu ortamda klorür iyonlarının difüzyonu, Fick'in ikinci difüzyon kuralına uymaktadır. Bu kural eğer klorür konsantrasyonu herhangi bir zamanda derinliğin fonksiyonu olarak biliniyor ise etkili difüzyon katsayısının bulunmasında kullanılabilir (Andrade vd., 1997; Yang ve Wang, 2004; Yang ve Cho, 2003; Zang vd., 1998). Fick'in ikinci yasası, durgun homojen ortam boyunca sadece iyonik olmayan difüzyon için geçerlidir. Klorürlü çözelti, iyonik çözelti olsa da beton kimyasal ve fiziksel bakımdan homojen olmayan dinamik bir ortamdır. Tüm bu eksikliklere rağmen Fick'in ikinci yasası, klorür penetrasyonu için mevcutlar içerisinde en pratik ve mükemmel metot olarak kabul edilmektedir (Khatri ve Sirivivatnanon, 2004). Sabit olmayan koşullarda ve x yönündeki yön kontrolsüz akış, 2.20 bağıntısında Fick'in ikinci yasasında verilmektedir (Şekil 2.27).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2.20)$$

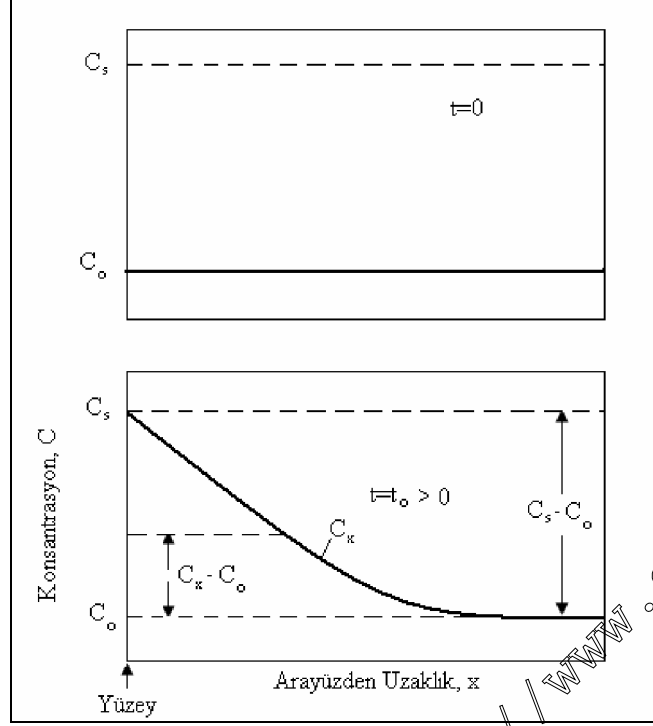
2.20 bağıntısının 2.21, 2.22 ve 2.23'te verilen başlangıç ve sınır şartları için çözümünden 2.24 bağıntısı elde edilir.

$$t=0, C=C_0 \quad 0 \leq x \leq \infty \quad (2.21)$$

$$t \geq 0, C=C_s \quad x=0 \quad (2.22)$$

$$C=C_0 \quad x=\infty \quad (2.23)$$

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (2.24)$$



Şekil 2.7 Sabit olmayan durumda difüzyon (<http://www.fsec.ucf.edu>)

Yukarıda verilen 2.24 bağıntısında, x , mesafeyi (cm); C_x , x derinliğindeki klorür konsantrasyonunu (%); C_o , yüzeydeki başlangıç klorür konsantrasyonunu (%); C_s , çözelti ile temas halinde olan yüzeyde klorür konsantrasyonunu (%); t , zamanı (sn); D , etkili klorür difüzyon katsayısını (cm^2/s) ve erfc , Gauss hata fonksiyonunu ifade etmektedir. Betonda klorür penetrasyonunun belirlenmesinde, Fick'in ikinci yasasının kullanılabilmesi için betonun yüzeyindeki ve farklı derinliklerdeki toplam klorür miktarının bilinmesi gerekmektedir. Konu ile ilgili yapılan deneysel çalışmalarda toplam klorür içeriği, betondan alınan toz numunelerde AASHTO T260 (1997)'ye göre belirlenmektedir (Yang ve Wang, 2004; Güneysisi, 2004).

Beton içine nüfuz eden klorür penetrasyon derinliği yaygın olarak kolorimetrik yöntem ile belirlenmektedir. Bu yöntemde beton yüzeyine 0.1 N AgNO_3 çözeltisi püskürtülmekte ve renk değişimi ile klorür penetrasyon derinliği belirlenmektedir. Ancak kolorimetrik yöntem hala sorgulanmaktadır çünkü klorür iyon konsantrasyonu ile renk değişim sınırı arasındaki eşitlik hakkında henüz uzlaşma sağlanamamıştır (Yang ve Wang, 2004).

2.4. Donatı Korozyonunun Ölçüm ve Değerlendirme Yöntemleri

Beton içine gömülü çeliğin korozyonunun araştırıldığı laboratuvar çalışmalarında çoğunlukla elektropotansiyel fark (volt) ve akım şiddeti (amper) ölçülür; ölçülen bir diğer büyüklük de ortamın elektriksel direncidir. Betonarme elemanlarda korozyon akımının çok küçük,

elektriksel direncin çok büyük olduğu dikkate alınır, ölçümlerde duyarlılığın önem kazandığı açıktır, bu bakımdan korozyon deneyleri için özel voltmetre ve ohmmetre cihazları geliştirilmiştir.

Beton içine gömülü donatıların yarı-hücre potansiyelinin belirlenmesi amacı ile ASTM C876 (1991)'de açıklandığı gibi referans elektrodu beton yüzeyine değdirilir, betona gömülü çelik çubukla referans elektrot arasında meydana gelen potansiyel farkı (E, volt) yüksek empedanslı bir voltmetre ile ölçülür (Akman, 1992). Betonun elektriksel direnci yüksek olduğundan deney sırasında ıslak olması zorunludur. Ölçüm değerleri, Çizelge 2.3'te verilen Yarı-hücre potansiyel değerleri ile karşılaştırılarak korozyon durumu belirlenir. Ölçümde genellikle Cu/CuSO₄ (bakır/bakır sülfat, CSE), Ag/AgCl (gümüş/gümüş klorür), kalomel (Hg-Hg₂Cl₂) elektodu kullanılır (ACI 222R, 2001; Baradan vd., 2002).

Çizelge 2.3 ASTM C 876 (1991) ve ACI 222R-01'e (2001) göre Yarı-hücre potansiyel kriterleri

| Yarı-hücre Potansiyel Değerleri, CSE (SCE)* | Korozyon Durumu |
|---|--|
| $E > -0.20 \text{ V}$ | Ölçüm yapılan anda ve bölgede %90'dan daha fazla olasılıkla korozyon yoktur |
| $-0.35 \text{ V} < E < -0.20 \text{ V} (-0.12 \text{ V})$ | Belirsizlik vardır |
| $E < -0.35 \text{ V} (-0.27 \text{ V})$ | Ölçüm yapılan anda ve bölgede %90'dan daha fazla olasılıkla korozyon oluşmaktadır. |

* Standart kalomel elektrodu

Yarı-hücre potansiyeli ölçümlerine göre, -0.35 V CSE değerinden daha negatif potansiyel değerleri genellikle sadece aktif korozyonun bulunup bulunmadığına işaret ederler, korozyon hızı hakkında bir fikir vermezler. Çünkü korozyon hızı, anot potansiyelinin büyüklüğünden çok anot ile katot arasındaki potansiyel farkın büyüklüğüne bağlıdır (Baradan vd., 2002). Hacıoğlu ve Kawamura (1992) tarafından yapılan deneysel çalışmada, bağlayıcı maddenin ağırlıkça %0, % 0.5 ve %2'si oranında katılan klorür ile üretilen betonlarda, referans CSE'ye göre yapılan yarı-hücre potansiyeli ölçümlerinden alınan sonuçlara göre ileri derecedeki korozyon hasarının tespitinde bu yöntemin güvenilir olmadığı ve ciddi şekilde çatlamış numunelerde yarı hücre potansiyel değerinin sadece -230mV değerinde olduğu ifade edilmektedir.

Betonarme korozyon deneylerindeki ikinci yaklaşımda, polarizasyon eğrilerinin çizilmesi, korozyon akım şiddetinin ve Tafel eğimlerinin hesaplanması amaçlanır. Bu durumda sistemin

sabit bir gerilim ile beslemesi ve sistemdeki gerilim düşmelerinin ve akım şiddetlerinin potansiyostat ile ölçülmesi gerekir. Ölçü sisteminde beton içindeki çelik, çalışan elektrot adını alır, verilen akımın şiddetine ve gerilime bağlı olarak donatı çeliği, anottan katoda doğru değişik davranışlar gösterir. Hücreyi tamamlamak üzere agresif ortam içine bir karşıt elektrot daldırılır. Eğer çalışan elektrot anot konumunda ise karşıt elektrot katot fonksiyonu görür. Karşıt elektrot camsi karbon, platin veya oksit kaplı titan olabilir. Bu arada çalışan elektrotun potansiyeli, beton yüzeyine yakın bir yerde tutulan referans elektroda göre belirlenir. Potansiyostat içinde bulunan bir ampermetre yardımı ile akım şiddeti ölçülür (Akman 1992). Vedalakshmi vd. (2000) tarafından yapılan deneysel çalışmada ortalama basınç dayanımı 20 MPa olan betonlar, %3'lük NaCl çözeltisi ile ıslanma-kuruma etkisinde bırakılmış, makro hücre korozyon ölçümleri ve donatı civarında suda çözünen klorür tayini deneyleri yapılmıştır. Anot civarındaki klorür içeriği, 2260-4500 ppm civarında iken katot civarındaki klorür içeriğinin 160-200 ppm civarında olduğu belirtilmiştir. Erdoğan vd. (2004) tarafından betonda klorür difüzyonunun açık-akım potansiyel yöntemi ile ölçüldüğü deneysel çalışmada, bu yöntemin beton içerisine klorür difüzyonunu belirlemede basit ve yaklaşık sonuçlar veren bir yöntem olduğu ifade edilmiştir.

Bir diğer ölçüm yönteminde ise sistemin potansiyel farkı, ASTM G109 (1992)'da açıklanan ve betonarme donatılarında anot ile katot bölgeleri arasına kurulan sabit direnç yardımı ile ölçülür ve direnç üzerinden geçen akım belirlenir. Bu ölçüm yöntemi esas olarak betondaki metallerin korozyonuna kimyasal katkıların etkisinin belirlenmesi için kullanılmaktadır. Standartta, ölçülen makro hücre potansiyel değerinden hesaplanan akım değerinin $10\mu A$ 'e eşit veya fazla olması durumunda korozyonun başladığına işaret edilmektedir.

Ayrıca hesaplanan akım değerleri yardımı ile sistemde oluşan toplam korozyon (TC, coulomb) kümülatif olarak hesaplanabilmektedir. Son yıllarda, beton içerisindeki donatının korozyon sürecini takip etmek üzere mini sensörler geliştirilmiştir. Bu mini sensörler yardımı ile inşaatın yapım aşamasından itibaren yapılan ölçümler sürekli olarak kaydedilmekte, donatının korozyonu hakkında fikir sahibi olunmaktadır (Andrade ve Martinez, 2003).

2.5 Korozyona Karşı Alınacak Önlemler

Betonarmenin korozyonunu önlemenin en önemli ve etkili yolu, donatının yeterli kalınlıktaki geçirimsiz beton ile örtülmesidir. Betonda geçirimsizliğin sağlanması için puzolan özelliği olan mineral malzemelerden ve kimyasal katkı maddelerinden yararlanır. Puzolanların harç ve betonda kullanılması ile sertleşmiş betonun boşluk yapısında ve geçirimsizliğinde iyileşme

sağlanmakta, bu da durabilite özelliklerini iyileştirmektedir (Bagel, 1998; Torii ve Kawamura, 1992; Bleszynski, 2002). Yoğun ve geçirimsiz beton üretiminde dünya genelinde puzolanlı çimentolar kullanılmaktadır. Puzolanik malzemelerin betonda kullanılması ile geçirimsizlik, nem difüzyonu ve zararlı maddelerin çelik-beton arayüzüne ulaşması olasılığı azalır (Saricimen vd., 1995). Puzolanlı betonların geçirimsizlikteki azalma, puzolanların geçiş bölgesine etkisinden kaynaklanmaktadır. Katkısız betonlarda geçiş bölgesi plaka şeklinde Ca(OH)_2 içermekte ve bu bölge daha az yoğun olmaktadır. Puzolanlar, geçiş bölgesinin özelliğinden başka kalınlığını da etkiler, örneğin geçiş bölgesinin kalınlığı katkısız betonlarda 2-3 μm iken puzolan ilave edilmesi ile bu kalınlık azalmaktadır (Saricimen vd., 1992). Nakamura vd. (1992) tarafından yapılan deneysel çalışmada, Portland çimentosuna %50 oranında yer değiştirmeli olarak inceliği 453 m^2/g , 786 m^2/g ve 1160 m^2/g olan yüksek fırın cürufu katılarak üretilen betonlarda, su geçirimsizlik katsayısının cüruf katkılı betonlarda azaldığı ancak katsayının cüruf inceliği 453 m^2/g ' dan 786 m^2/g olan betonlarda birbirine yakın olduğu, inceliğin 1160 m^2/g 'a çıkması ile katsayının ciddi oranda düştüğü ve toplam boşluk hacmi ile su geçirimsizliğinin doğrudan ilişkili olduğu ifade edilmiştir. Katkılı veya katkısız betonlarda geçirimsizliği düşük beton elde etmek için betonların sürekli suda kür edilmesi şarttır (Saricimen vd., 1992; Danson, 2002).

Dongxue vd. tarafından yapılan deneysel çalışmada, yüksek fırın cürufu katkılı betonların porozitesinin 7. ve 28. günlerde normal Portland çimentolulara göre bir miktar daha fazla ancak boşluk boyutu dağılımının birbirine benzer olduğu ifade edilmektedir. Ancak 3 yıl sonra cüruf katkılı betonlarda, porozitenin düştüğü ve boşluk hacminin 28. günlük betonlara kıyasla %50 oranında azaldığı, boşluk çapının 31 nm' den 9.9 nm'ye ve 25 nm'den 14.5 nm'ye düştüğü ve 100 nm' den büyük zararlı boşlukların kalmadığı ifade edilmektedir. Cüruf katkılı betonların boşluk yapısı hidrasyonun ilerlemesi ile iyileşmiş yani hidrasyon ürünleri serbestleşmiş çimentodaki boşlukları doldurarak yoğunluğu arttırmıştır. Bunlar, cüruf çimentoların durabilitesinin arttığı anlamına gelir (Dongxue vd., 1997).

Gao vd. (2005) tarafından cüruf katkılı betonlar üzerinde yapılan iç yapı çalışmasında, yüksek fırın cürufunun puzolanik reaksiyonunun erken yaşlarda başladığı ve 7. günden 28. güne doğru kür süresinin artması ile daha belirgin olduğu ve reaksiyon hızının cürufun özgül yüzeyi ile doğru orantılı olduğu ifade edilmektedir. Ayrıca cürufun agrega-harç arayüz geçiş bölgesindeki Ca(OH)_2 kristallerinin miktarını azaltarak arayüz geçiş bölgesini daha yoğun yaptığı ve bu etkiler sonucunda uygun oranlarda kullanılan cüruf ile yüksek dayanımlı betonlar elde edilebileceği ifade edilmektedir.

Osborne (1992) tarafından yapılan hızlandırılmış laboratuvar testlerinden alınan sonuçlara göre, C_3A içeriği yüksek olan çimentolar ile üretilen numunelerin donatı korozyonuna karşı belirgin bir olumlu etkisi olduğu gösterilmiş, bunun nedeninin, C_3A 'nın çimentodaki serbest klorürleri bağlayarak çözünmez kalsiyum-kloro-alüminat birleşimi oluşturmasına bağlanmıştır.

Al-Amoudi vd. (1992) tarafından yapılan deneysel çalışmada, yüksek klorür ve sülfat konsantrasyonu etkisinde yüksek durabilite performansı için, cüruf veya silis dumanı katkılı betonların donatı korozyonunu geciktirmek için faydalı olduğu, ilave olarak yüzeyin su geçirmez epoksi bazlı kaplamalar ile kaplanmasının betonun dış yıpratıcı etkilerden korunması için gerekli olduğu ifade edilmektedir.

Oh vd. (2002) tarafından farklı tip ve oranlarda mineral katkı içeren, düşük su/bağlayıcı oranlarındaki betonların klorür geçirimsizliği ile ilgili deneysel çalışmada, çimentonun yüksek fırın cürufu ile ikame edilmesinin, cürufun ikincil reaksiyonu sonucunda daha yoğun mikroyapı oluşturmasına bağlı olarak klorür permeabilitesini azalttığı, uygun cins ve miktarda mineral katkı kullanılmasının, klorür permeabilitesini azaltmada, su/bağlayıcı oranının azaltılmasından daha etkili olduğu ifade edilmektedir.

2.5.1 Puzolanlar

Günümüzde, beton üretiminde, agrega-çimento hamuru arayüzünü ve çimento hamurundaki boşlukları doldurmak için silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi puzolanik özellikteki mikro filler malzemelerin süperakışkanlaştırıcı katkı maddeleri ile birlikte kullanılması, beton teknolojisinde büyük ilerlemelere yol açmıştır. Süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkıların kullanılması s/ç oranının düşmesini, ultra ince mineral malzeme kullanılması boşlukların doldurulmasını ve daha yoğun bir malzemenin oluşturulmasını sağlamıştır. Sonuç olarak betonun hem basınç dayanımı hem de dayanıklılığı artmıştır (Taşdemir ve Akyüz, 1999). Aşağıda puzolanların tanımı, tarihçesi, özellikleri, puzolanik aktivitenin araştırılması ve betona etkileri genel olarak, çalışmanın konusu olan yüksek fırın cürufunun betonda kullanımı ve beton özelliklerine etkileri ise etraflıca açıklanmıştır.

Puzolanlar, kendi başlarına bağlayıcılık özelliği olmayan veya az bağlayıcılık özelliği gösterebilen, sönmüş kireç veya çimento ile birlikte kullanıldığında bağlayıcılık özelliği kazanan inorganik kökenli malzemelerdir. Bunlar silisli veya silisli ve alüminli malzemelerdir, bileşiminde silisin ve alüminin yanı sıra demir oksit, kalsiyum oksit, alkaliler ve karbon bulunabilmektedir (Erdoğan, 2003; Postacıoğlu, 1986; Neville, 1990; Akman, 1987). Puzolan, adını İtalya'daki Vezüv yanardağının eteklerinde bulunan "Pozzuoli"

kasabasından almıştır. Milattan yaklaşık 100 yıl önce eski Romalılar, Pozzuoli kasabasının civarındaki volkanik kül ve söndürülmüş kirecin su ile karılmasından elde edilen malzemenin hidrolik bağlayıcılık özelliği gösterdiğini fark etmişler, bu malzemeyi yapılar da kullanmışlardır. Su altında da sertleşme gösterebilen bu malzeme “puzolan” adı ile anılmaya başlanmıştır (Erdoğan, 2003).

Puzolanların bileşiminde yukarıda da belirtildiği gibi fazla miktarda kolloidal halde silis ve alümin bulunmaktadır. Puzolan malzeme, bu maddelerin kireç ile reaksiyonu sonunda bağlayıcılık özelliği kazanır, kireci bağlar. Puzolan ile portland çimentosu karıştırıldığında da SiO_2 ve Al_2O_3 ile çimentonun hidrasyonu sonunda açığa çıkan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ arasındaki reaksiyon sonucunda, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tespit edilir, başka bir deyiş ile çözülmez duruma getirilir, böylece çimento, su ve kimyasal etkilere daha dayanıklı olur (Postacıoğlu, 1986; Akman, 1987).

Bir puzolanın reaksiyon sonunda tespit ettiği kireç miktarı ne kadar fazla ise reaktivitesi o kadar büyük, puzolanik özelliği o kadar yüksektir (Postacıoğlu, 1986). Bu özellik “Puzolanik Aktivite” olarak tanımlanır (Erdoğan, 2003). Puzolanik reaktiviteyi etkileyen faktörler, kimyasal bileşim, amorf yapı ve incelik olarak sayılabilir. Bunlardan inceliğin, en önemli faktör olduğu söylenebilir, çünkü öğütme insan eli ile yapılmaktadır ve inceliğin artırılması mümkündür. Puzolanik özelliği etkileyen diğer faktörler, yukarıda işaret edildiği gibi puzolanın içerdiği SiO_2 ve Al_2O_3 gibi reaktif maddelerin miktarı, amorf veya camsı ve zeolitik fazda bulunmasıdır; kristal yapıdaki alümin ve silisin reaktif özelliği yoktur. Bu açıklamalara göre puzolanik aktivitenin yüksek olması için puzolan maddelerde fazla miktarda, amorf SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 bulunmalı, CaO miktarı az olmalı, puzolan çok ince öğütülmelidir. Reaktif maddelerin oranı 2.25’te verildiği gibi %70’den fazla, CaO miktarı da %4’den az olmalıdır.

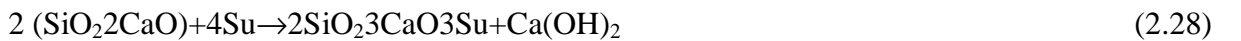
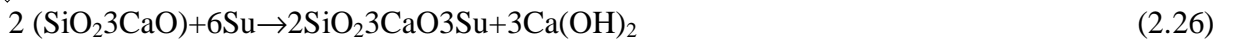
$$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 0.70 \quad (2.25)$$

Bu iki koşulun sağlanması o maddenin puzolan olduğunu göstermez, puzolanik özelliğe sahip olup olmadığı deneysel olarak kanıtlanmalıdır (Postacıoğlu, 1986). Puzolanları doğal ve yapay olmak üzere iki büyük gruba ayırmak mümkündür (Postacıoğlu, 1986; Erdoğan, 2003).

Doğal puzolanlar, volkanik camlar, volkanik tüfler, traslar, diatomeli topraklar ve bazı killer ve şeyllerdir. Doğal puzolanlar, dünyanın belirli bölgelerinde örneğin, Almanya’da, İtalya’da, Yunanistan’da, Türkiye’de bulunur. Almanya’da Ren vadisinden çıkarılan doğal puzolanlara Tras adı verilir. Bu puzolan, üstün özelliklere sahip olduğundan birçok ülkede ve ülkemizde tras, puzolan sözcüğünün yerini almıştır. İkinci önemli puzolan yatağı, İtalya’da Roma ve

Napoli arasındaki bölgede yer almaktadır. Yüksek nitelikli puzolanların bulunduğu bir diğer bölge de Ege Denizi'nde Yunanistan'a bağlı Santorin adalarıdır. Ülkemizde, Çorum civarında Mecitözü'nde, Kayseri ve Nevşehir civarlarında geniş puzolan yatakları bulunmaktadır (Akman, 1987; Postacıoğlu, 1986; Erdoğan, 2003). Yapay puzolanlar, pişmiş kil, granüle yüksek fırın cürufu, uçucu küller ve silis dumanı gibi endüstriyel yan ürünlerdir. Yapay puzolan olarak bilinen maddelerin en önemlilerinden biri pişmiş kildir. Kil, şeyl ve diatomeli toprak, önce ısıtılma tabii tutulup daha sonra ince taneli duruma getirildiğinde puzolanik özellik kazanır (Akman, 1987; Erdoğan, 2003). Bu amaçla kil, bileşimine bağlı olarak 600-900 °C arasındaki sıcaklıkta pişirilir, elde edilen madde öğütülür. Tuğla tozu ve kireç karışımından oluşan ve "Horosan Harcı" olarak bilinen bu bağlayıcı madde, Osmanlı mimarisinde yaygın olarak kullanılmıştır. Bu bağlayıcı madde, yağlı kireçten çok üstün özelliklere sahiptir ve su yapılarında kullanılmaya elverişlidir. Nitekim çimento icat edilmeden önce 1786'da inşaa edilen Cezayir limanında bağlayıcı madde olarak pişirilmiş kil ve kireç karışımı kullanılmıştır (Postacıoğlu, 1986). Yapay puzolan olarak kullanılan diğer maddeler, uçucu kül, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi endüstri atığı maddeler ve pirinç kapçığı külü, buğday sapı kütüğü gibi tarım artıklarının yakılması ile elde edilen küllerdir (Torii ve Kawamura, 1992; Mazlum, 1989; Biricik, 1995). Sönmüş kireç veya çimento ile birlikte kullanılan doğal veya yapay puzolanlar, Ca(OH)₂'i bağlaması ve ince boşlukları doldurması nedeni ile betonun zararlı ortama karşı dayanıklılığını artırır (Mehta ve Gjorv, 1982; Bonen, 1993). Puzolanlar, söndürülmüş kireç ve su ile doğrudan kullanılabilirler gibi, çimento üretiminde, portland çimentosunun klinkeri ile birlikte öğütülerek veya beton üretiminde çimento ile birlikte katkı maddesi olarak kullanılmaktadırlar.

Bilindiği üzere portland çimentosunun dikalsiyum silikat (C₂S) ve trikalsiyum silikat (C₃S) gibi ana bileşenlerinin su ile reaksiyonları sonucunda 2.26-2.29 bağıntılarından görüldüğü gibi bağlayıcılık özelliği olan kalsiyum-silikat-hidrat (CSH) jelleri ve kalsiyum hidroksit oluşmaktadır (Erdoğan, 2003; Postacıoğlu, 1986).



Puzolanlar su ile karşılaştığında ilk aşamada puzolan ile çimentodaki alkalilerden kaynaklanan alkali hidroksit arasındaki reaksiyonlar, ikinci aşamada ise, çimentonun hidratasyonu ile ortaya çıkan kalsiyum hidroksitle puzolan arasında güçlü reaksiyonlar oluşmaktadır. Puzolan ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in reaksiyonu sonucunda C-S-H jelleri gibi çok kuvvetli hidrolik bağlayıcı özellikteki ürünler ortaya çıkmaktadır. Ortam sıcaklığı arttıkça, çimentodaki alkali hidroksitlerin çözünebilirliği artmakta ve reaksiyonlar daha erken oluşabilmektedir (Erdoğan, 2003).

Puzolanik Aktivite

Puzolanlara puzolanik özellik kazandıran SiO_2 , Al_2O_3 , ve Fe_2O_3 'ün miktarı, amorf yapısı ve puzolanın inceliğidir. Amorf silis kalitatif olarak X-Işını difraktometresi ile, kantitatif olarak da kimyasal gravimetrik yöntemlerle belirlenebilir (Bidin vd., 1984). Puzolanik aktivite, kimyasal, mekanik ve fiziksel deneyler ile araştırılır (Neville, 1990). Puzolanik aktiviteyi belirleyen ya da buna önemli ölçüde katkıda bulunan faktörler, maddenin kimyasal bileşimi, termodinamik kararsızlığı ve özgül yüzeyidir.

Puzolanik Aktivitenin Kimyasal Deneyler ile Araştırılması

Puzolanik özellik, hidrate çimento ile temas halinde olan sulu çözeltideki kalsiyum hidroksit miktarının, aynı alkalitedeki çözeltiyi doymun hale getirebilen kalsiyum hidroksit miktarıyla karşılaştırılması ile değerlendirilir. Çözeltideki kalsiyum hidroksit iyonu konsantrasyonu doymun konsantrasyondan daha düşük ise deney olumlu olarak kabul edilir. Hidroksit iyonu konsantrasyonu ve kalsiyum oksit konsantrasyonu belirlenir. Çözeltideki hidroksit iyonları ve kalsiyum oksit konsantrasyonlarının ortalaması grafikte işaretlenir. Bu nokta çözeltideki kalsiyum oksitin doymunluk konsantrasyonunu, 40°C 'deki hidroksit iyonu konsantrasyonunun fonksiyonu olarak gösterir. İşaretlenen nokta, kalsiyum oksitin doymunluk konsantrasyonunun altında ise puzolan, puzolanik özellik deneyini sağlar (TS EN 196-5, 2002).

Puzolanik Aktivitenin Mekanik Deneyler ile Araştırılması

Mekanik deneylerde TS 25 (1975) Traslı çimento standardında belirtildiği şekilde hazırlanan numunelerde eğilme ve basınç deneyleri yapılır. Bunun için Çizelge 2.4'te TS 25'e (1975) göre, 1 dm^3 harç için verilen miktarlarda puzolan malzeme, sönmüş kireç, standart kum ve su karıştırılarak elde edilen ve standarda uygun koşullarda saklanan $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$. boyutundaki harç numunelerde 7. günde TS EN 196-1 (2002)'ye göre eğilme deneyi ve kırılan parçalarda

basınç deneyleri yapılır. Eğilme mukavemetinin 1 N/mm^2 den, basınç mukavemetinin 4 N/mm^2 den büyük olması halinde maddenin puzolanik özelliğe sahip olduğu kabul edilir.

Çizelge 2.4: Harç üretimi (1 dm^3) için gerekli malzeme miktarları (TS 25, 1975)

| Malzemeler | Standart Miktarlar |
|--------------|---|
| Standart kum | 1350 g |
| Sönmüş kireç | 150 g |
| Puzolan | $2 \times 150 \times (\delta_p / \delta_k)$ |
| Su | $0.50(150 + \text{puzolan})$ |

Puzolanik Aktivitenin Fiziksel Deneyler ile Araştırılması

Puzolanların reaktivitesi spektrofotometrik ve kalorimetrik yöntemler ile fiziksel olarak daha hızlı bir şekilde saptanabilir (Bidin vd., 1984; Massazza, 1989). Puzolanik aktivitenin fiziksel yollar ile incelenmesi için X-Ray Analizi (X-Ray), Diferansiyel Termal Analiz (DTA) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile incelemeler yapılır. X-Ray analizlerinde piklere rastlanmaması yapının amorf olduğunu gösterir SEM incelemesinde ise puzolan maddenin farklı büyütme oranlarında fotoğrafları çekilir bu bölgelerde difraktogram ile kalitatif kimyasal analiz yapılır ve difraktogramı alınır. DTA-TG analizleri, oda sıcaklığından başlayıp, $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ kadar ulaşan sıcaklık aralıklarında, minerallerin veya farklı türdeki kimyasal maddelerin ısı artışı karşısında göstermiş oldukları ağırlık ve enerji değişimlerini grafiksel olarak belirlemek için kullanılır. DTA-TG analizleri yardımıyla, minerallerdeki kristalografik dönüşümler, erime, bileşimsel bozuşma, su kaybı gibi özellikler belirlenir. Analiz edilecek olan maddelerin monominerallik (tek mineralli) olması tercih edilir. Bu yöntem özellikle seramik hammaddelerinin araştırılmasında yaygın olarak kullanılır (www.mta.gov.tr).

Bu çalışmanın konusu olması nedeni ile önemli bir endüstri atığı olan yüksek fırın cürufu (YFC) aşağıda ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

2.6 Yüksek Fırın Cürufu

Yüksek fırın cürufu, demir çelik endüstrisinin önemli bir atığıdır, atığın yapı sektöründe değerlendirilmesinin enerji tasarrufuna ve çevre sorunlarının çözümüne katkısı olduğu açıktır. Çelik üretiminin hammaddesi olan demir filizi, kok kömürü ve kalker taşı üretimin ilk aşamasında yüksek fırınlarda yüksek sıcaklıklarda ergitilir. Fırın altından akan malzeme pik demiri ve onun üzerinde yüzen cüruftur. Pikten kolayca ayrılan cüruf, ani soğutulduğunda iri

taneli, hafif ve amorf bir malzemeye dönüşür. Bu taneli malzemeye “yüksek fırın cürufu” veya “letiyе” denir (Akman, 1992; Postacıoğlu, 1986; ACI 226.1R, 1987).

Yüksek fırından atık malzeme olarak dışarıya çıkartılan eriyik durumdaki cüruf yaklaşık 1500 °C sıcaklıktadır. Eriyik cürufun çok hızlı soğutulması işleми, mümkün olduğu kadar basınçlı su püskürtülerek gerçekleştirilmelidir. Ancak bu şekilde cürufun bağlayıcılık özelliği en iyi duruma getirilmiş olur. Yapılan incelemeler, 1 ton cüruf için yaklaşık 1 ton suyuğ kullanılması yeterli olduğunu göstermektedir (Erdoğan, 2003; Postacıoğlu, 1986).

Yüksek fırın cürufu, bileşimindeki maddeler nedeni ile klinker ile birlikte veya ayrı ayrı öğütülerek cürufllu çimento üretiminde, kilin yerine klinker üretiminde ve taneli yapısı nedeni ile beton üretiminde veya yol yapımında agrega olarak kullanılır (Akman, 1992; Postacıoğlu, 1986).

YFC, diğer puzolanlardan farklıdır çünkü kireçle karıştırılmadan da zayıf bağlayıcı özelliğine sahiptir (Akman, 1992; Postacıoğlu, 1986). Bu konuda yapılan çalışmalara göre; cürufun bileşimindeki maddelerin oranı, Çizelge 2.5’te görüldüğü gibi, ülkelere göre demir üretiminde kullanılan cevherin birleşimine ve uygulanan üretim sistemine bağlı olarak oldukça geniş bir aralık içinde değişmektedir (Postacıoğlu, 1986; Erdoğan, 2003).

Çizelge 2.5: Yüksek fırın cüruflarının kimyasal bileşimi (Erdoğan, 2003).

| Kimyasal Bileşim | ABD ve Kanada | Güney Afrika | Avustralya | Türkiye |
|--------------------------------|---------------|--------------|------------|---------|
| | % | | | |
| CaO | 29-50 | 30-40 | 39-44 | 34-41 |
| SiO ₂ | 30-40 | 30-36 | 33-37 | 34-36 |
| Al ₂ O ₃ | 7-18 | 9-16 | 15-18 | 13-19 |
| Fe ₂ O ₃ | 0.1-1.5 | - | 0-0,7 | 0.3-2.5 |
| MgO | 0-19 | 8-21 | 1-3 | 3.5-7.0 |
| MnO | 0.2-1.5 | - | 0.3-1.5 | 1.0-2.5 |
| S | 0-2.0 | 1.0-1.6 | 0.6-0.8 | 1.0-2.0 |

Bu maddeler çimentoyu oluşturan maddelerdir, bu nedenle cüruf, çimento klinkerinin üretiminde, üretimin ilkel maddesi olan kilin yerine kullanılır. Yüksek fırın cürufunun portland çimentosu klinkeriyle öğütülerek cürufllu çimento elde edilmesi oldukça eskiye dayanan bir uygulamadır. Cürufun çimentoya karıştırılması ilk defa 1863’de Almanya’da Langen tarafından gerçekleştirilmiştir. İlk cürufllu çimentolar, Almanya’da 1892’de, ABD’de 1896’da üretilmeye başlanmıştır. Fransa’da cürufun çimentoda kullanılması ancak 1934

senesinde resmen kabul edilmiştir. Bu tür çimentoların tüketimi yıldan yıla devamlı bir artış göstermiştir (Postacıoğlu, 1986; Erdoğan, 2003).

Çimentolar, TS EN 197-1 (2002) standardında belirtildiği üzere CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV ve CEM V olmak üzere 5 ana tipe ayrılmıştır. Bu ana tiplerden CEM III tipi, “Yüksek fırın cürüflü çimento” olarak anılmaktadır. İçerdiği klinker ve cüruf miktarına göre CEM III/A, CEM III/B ve CEM III/C üç alt sınıfa ayrılmıştır ve CEM III/A’da kütlece klinker %35-64, cüruf %36-65; CEM III/B’de %20-34 klinker, %66-80 cüruf ve CEM III/C’de klinker %5-19, cüruf %81-95 oranlarındadır. Ayrıca CEM II tipinde CEM II/A-S ve CEM II/B-S gibi 2 alt sınıf da mevcut olup bunların klinker içeriği sırası ile %80-94 ve %65-79; cüruf içeriği %6-20 ve %21-35’dir. CEM V tipinde %20 ile %64 arasında klinker, %18 ile %50 arasında cüruf bulunurken yukarıda verilen diğer tiplerden farklı olarak %18-%50 arasında farklı puzolanlar da bulunmaktadır. TS EN 197-1 (2002)’de 2.25 bağıntısında verilen sınırlamadan başka bir sınırlama mevcut değildir. ASTM C 989 (2005) ve BS 6699 (1992) de ise, Portland çimentosu ile kullanılacak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu için bazı kısıtlamalar getirmiştir. ASTM C989 (2005)’de inceliğin (45µm elek bakiyesi) maksimum %20, cürüflü harcın hava miktarının maksimum %12, SO₃ miktarının maksimum %4.0, kükürt (sülfid olarak) miktarının maksimum %2.5 olması gerektiği belirtilmektedir. BS 6699 (1992)’de ise cüruf dışında yabancı maddenin maksimum %10, MgO miktarının maksimum %13, kükürt (sülfid olarak) miktarının maksimum %2.0, SO₃ miktarının maksimum %2.5, inceliğin minimum 2750 cm²/g olması gerektiği belirtilmektedir. SO₃ ve kükürt (sülfid olarak) miktarının sınırlandırılmasındaki amaç, kükürtün betonarme donatısında korozyonu arttırmamasından kaynaklanmaktadır (Demirbaş vd., 2001; Czerewko vd., 2003). Bazı organik kükürt içeren molekül bileşikler donatı üzerinde adsorblanarak demiri ayrıştırır ve ayrıştırmada asidik ortamda H₂S açığa çıkararak donatının krozyonunu hızlandırabilir (Cheng vd., 1999; Holloway ve Sykes, 2005).

2.6.1 Yüksek Fırın Cürufunun Bağlayıcı Madde Olarak Kullanılması

Doğal puzolanlarda olduğu gibi, yüksek fırın cürufunun da bağlayıcı madde olarak kullanılabilmesi kimyasal bileşim, iç yapı özellikleri ve incelik gibi koşulları sağlaması gerekir. Bu koşullar üç grup altında toplanabilir.

Kimyasal bakımdan gerekli koşullardan biri TS EN 197-1 (2002)’de verilen 2.30 bağıntısıdır.

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} \geq 1 \quad (2.30)$$

Bu bağıntıda, SiO₂, cüruftaki çözünen silis miktarını, CaO, MgO ve Al₂O₃ sırasıyla cürufun içerdiği kireç, magnezi ve alümin miktarlarını yüzde cinsinden göstermektedir. Bu kriter kesin olmayıp ülkelere göre değişmektedir. Örneğin, Japonya'da bu değer 1.4 'den, Almanya'da 1.6 'dan büyük olması, Amerikan standartında ise 2.31 bağıntısında verilen koşul aranmaktadır (Postacıoğlu, 1986).

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \frac{1}{2} \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + \frac{2}{3} \text{Al}_2\text{O}_3} > 1 \quad (2.31)$$

Cüruf özelliklerinde alüminyum ve magnezyum katyonlarının oynadığı rol göz önüne alınarak 2.32 bağıntısındaki (k_i) faktörü ileri sürülmektedir (Postacıoğlu, 1986).

$$k_i = \frac{M_e O_6}{M_e O_4} \quad (2.32)$$

Bu bağıntıda, M_e simgesi ile, Al ve Mg katyonları gösterilmektedir. Yapılan araştırmalarda k_i faktörü 0.35 civarında değer alırsa cüruf, bağlayıcı madde olarak en yüksek mukavemetine ulaşmaktadır. Yukarıdaki ifadede 6 ve 4 indisleri, Al ve Mg metallerinin koordinasyon valansıdır. Bu konuda her ülkede değişik kriterler önerilmiş olsa da bunlar, birbirinden pek farklı değildir; önemli olan, cürufun kimyasal bileşiminin gerekli koşulu sağlayıp sağlamadığının araştırılmasıdır. Koşul sağlanıyor ise cürufun bağlayıcı madde olabileceği anlaşılır ve aşağıda belirtilen özelliklere sahip olup olmadığı araştırılır (Postacıoğlu, 1986).

Cüruf, amorf veya camı yapıda ise bağlayıcı özelliğe sahiptir. Cürufun en iyi şekilde camlaştırılması, en reaktif cürufun meydana getirildiği anlamına gelmez. Cüruf tanelerinin yüzeyindeki kusurlar, bağlayıcı madde özelliğinin en yararlı bölgeleridir. X ışınları yardımıyla yapılan araştırmalarda, cürufta bir takım mikro-homojensizlik bölgelerinin bulunduğu, bu bölgelerin boyutlarının küçülmesi cürufun bağlayıcılık özelliğini arttırdığı bulunmaktadır (Postacıoğlu, 1986).

Cürufun bağlayıcı madde olarak kullanılabilmesi için en az çimento inceliğinde öğütülmesi gerekir. Öğütme işleminde, ya cüruf klinkere karıştırılıp uygun miktarda alçıtaşı ilavesiyle birlikte öğütülür (Postacıoğlu, 1986) ya da cüruf önce öğütülür sonra çimentoya karıştırılır (Taşdemir vd., 2000). Klinker ve cürufun ayrı öğütülmesi ile tanelerin istenilen inceliğe getirilmesinde büyük randıman sağlanmaktadır, çünkü granüle yüksek fırın cürufu, portland çimentosu klinkerinden daha serttir ve klinker ile birlikte öğütüldüğünde, klinker daha ince taneli, cüruf ise daha iri taneli kalmaktadır (Erdoğan, 2003; Öner vd., 2003). Cürufun

öğütülmesi konusunda önemli bir değişiklik Belçikalı mühendis Trief tarafından yapılmıştır. Bu metotta su verilmiş cüruf, yaş halde iken öğütülmekte ve yine yaş olarak özel silolarda saklanmaktadır. Bu şekilde hazırlanan cüruf beton üretimi sırasında doğrudan betoniye konularak çimentoya karıştırılmaktadır. Bu yöntemin, kurutma işinin ortadan kaldırılması ve yaş haldeki cürufun daha ince öğütülmesinin sağlanması gibi iki önemli üstünlüğü vardır. Fransa'da İkinci Dünya Savaşından sonra Bort-les-Orgues barajının yapımında bu metod uygulanarak üretilen cüruf, portland çimentosuna %70 oranında karıştırılmış, elde edilen bağlayıcı madde başarıyla kullanılmıştır (Postacıoğlu, 1986).

2.6.2 Yüksek Fırın Cürufunun Puzolanik Aktivitesinin Araştırılması

Yüksek fırın cürufunda, genel puzolanik aktivite deneylerine ilave olarak bazı deneyler yapılır, bu deneyler, sonuç alma süresine göre aşağıda sırası ile açıklanmıştır.

Bu konuda geliştirilen ve 10 dakika gibi çok kısa sürede sonuç alınan deneysel yöntemde, cüruf taneleri belirli bir süre çok kısa dalga (morötesi) ışıkların etkisi altında bırakılır. Cüruf taneleri belirli bir "luminesans" ışık dalgası meydana getiriyor ise cürufun bağlayıcılık özelliği iyidir. Mekanik deney sonuçları ile yapılan karşılaştırmalar bu metodun güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır (Postacıoğlu, 1986).

Cürufun bağlayıcılık özelliğinin araştırılması ve kısa sürede bilgi edinilmesinde yararlanılan bir diğer deney yönteminde, %20'lik NaOH ile bir sud çözeltisi hazırlanır. Cüruf, standart kum ve sud kostik çözeltisi ağırlıkça 1:3:0.5 oranlarında karıştırılarak harç üretilir, 4x4x16 cm boyutundaki kalıplara yerleştirilen harç 6 saat kalıpta tutulur. Bu süre sonunda kalıptan çıkarılan numunelerin bir kısmında hemen basınç deneyi yapılır. Geri kalan numuneler kalıptan çıkarılarak 18 saat 20 °C'deki suda tutulduktan sonra (toplam 24 saat), basınç deneyine tabi tutulur, 6 saatlik basınç mukavemeti 8 N/mm² ve 24 saatlik mukavemet 12.5 N/mm² ise bağlayıcılık iyidir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Yüksek fırın cürufunun betonun kalıcılığına etkilerini araştırmak amacı ile düzenlenen deneysel çalışmada ön deneyler, numune üretimi, eskitme süreci ve kontrol deneyleri olmak üzere 4 aşamada gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada, malzemelerin özellikleri ön deneyler ile belirlenmiş, numunelerin üretiminde ve eskitme sürecinde kullanılan malzemeler, numune üretimi, eskitme süreci ve kontrol deneyleri ile ilgili açıklamalar aşağıda verilmiştir.

3.1 Üretimde Kullanılan Malzemeler

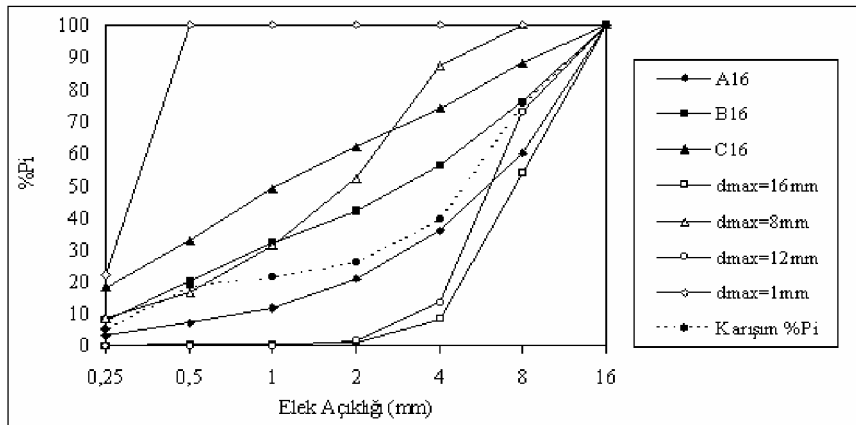
Beton üretiminde, özellikleri aşağıda verilen agregalar, çimento, yüksek fırın cürufu, süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi, betonarme numuneler için ϕ 14'lük düz inşaat çeliği ve klorür etkisini araştırmak için sanayi tipi magnezyum klorür tuzu kullanılmıştır.

Agregalar

Beton üretiminde fiziksel özellikleri Çizelge 3.1'de verilen kalker esaslı kırmataşlar ile silis esaslı kum kullanılmıştır. Agregaların özelliklerinin ve granülometrisinin belirlendiği deneyler TS 3529 (1980) ve TS 706 EN 12629 (2003)'a uygun olarak yapılmış, agregaların ve karışımın granülometri eğrileri Şekil 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Üretimde kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

| Agrega (d_{max} , mm) | Agrega Tipi | Δ (kg/m^3) | γ (kg/m^3) | Karışım Oranları (%) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 16 | Kalker Esaslı Kırmataş | 1280 | 2610 | 35 |
| 12 | | 1350 | 2610 | 30 |
| 8 | | 1740 | 2610 | 20 |
| 1 | Silis Esaslı Kum | 1510 | 2610 | 15 |



Şekil 3.1 Agregalara ait granülometri eğrileri

Çimento

Beton üretiminde, fiziksel özellikleri, kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2’de verilen AkçanSa çimento fabrikasından temin edilen PÇ 42.5 çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun özgül ağırlık, yoğurma suyu, priz süresi gibi fiziksel, eğilme ve basınç dayanımı gibi mekanik özellikleri için deneyler, TS EN 196-1 (2002)’e göre tekrarlanmıştır.

Çizelge 3.2 Çimento ve yüksek fırın cürufunun kimyasal, fiziksel ve mekanik deney sonuçları

| | Bileşim (%) | Portland Çimentosu (PÇ 42.5) | | | | Yüksek Fırın Cürufu | | | |
|---------------------------|--|------------------------------|--------|------------------------|--------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|
| Kimyasal Özellikler | CaO | 64.01 | | | | 33.48 | | | |
| | SiO ₂ (Çözünen) | 20.01 | | | | 41.43 | | | |
| | Al ₂ O ₃ | 5.28 | | | | 10.28 | | | |
| | Fe ₂ O ₃ | 3.65 | | | | 3.48 | | | |
| | MgO | 1.21 | | | | 6.05 | | | |
| | SO ₃ | 2.47 | | | | | | | |
| | Cl ⁻ | 0.033 | | | | 0.012 | | | |
| | Na ₂ O/K ₂ O | 0.25/0.81 | | | | 0.41/1.72 | | | |
| | Kükürt | - | | | | 1.64 | | | |
| | Kızdırma Kaybı | 2.27 | | | | 0.61 | | | |
| Çözünemeyen Kalıntı (max) | 0.32 | | | | - | | | | |
| Fiziksel Özellikler | Özgül Ağırlık (g/cm ³) | 3.14 | | | | 2.89 | | | |
| | Özgül yüzey, Blaine (cm ² /g) | 3570 | | | | 4730 | | | |
| | Priz Süresi Vicat (saat) | Başlangıç | | 2 sa. 25 dak. | | | | | |
| Bitiş | | 3 saat | | | | | | | |
| Mekanik Özellikler | * TS EN 196-1 ** TS 25 | Eğilme Dayanımı* (MPa) | | Basınç Dayanımı* (MPa) | | Eğilme Dayanımı** (MPa) | | Basınç Dayanımı** (MPa) | |
| | | 7.gün | 28.gün | 7.gün | 28.gün | 7.gün | 28.gün | 7.gün | 28.gün |
| | | 6.3 | 9.3 | 33.9 | 50.1 | 2.6 | - | 9.3 | - |

Yüksek Fırın Cürufu

Fiziksel özellikleri, kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2’de verilen yüksek fırın cürufu Karabük Demir Çelik fabrikasından temin edilmiş, Blaine özgül yüzeyi 4730 cm²/g olacak şekilde öğütülmüştür. İnceltelen yüksek fırın cürufunun puzolanik aktivitesi TS 25 (1975)’e göre araştırılmış, sonuçlar Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Süperakışkanlaştırıcı

Farklı cüruf içeriğindeki taze betonda eşit işlenebilmeyi sağlamak amacı ile piyasadan temin edilen ve özellikleri Çizelge 3.3’te verilen modifiye polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır.

Çizelge 3.3 Katkı maddesinin özellikleri

| Tipi | 3. nesil süperakışkanlaştırıcı beton katkısı, yüksek oranda su azaltıcı |
|------------------|---|
| Standart | EN 934-2 & SIA 162 (1989) standardına uygun |
| Esası | Modifiye Polikarboksilat Esaslı |
| Görünüm | Uçuk sarı |
| Katı Madde Oranı | %34 |
| Yoğunluk | 1.10±0.02 kg/l |
| Viskozitesi | Düşük |
| pH | 7.3 |
| Klorür oranı | Yok |

Donatı

Betonarme numunelerin üretiminde, ϕ 14'lük BÇ Ia düz donatı çeliği kullanılmıştır. Çeliğin mekanik özellikleri TS 708'e (1996) uygun olarak gerçekleştirilen deney ile belirlenmiş, sonuçlar Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 Donatının mekanik özellikleri

| | f_{sy} (Mpa) | f_{su} (Mpa) | f_{su}/f_{sy} | ϵ_u (%) |
|----------------------------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|
| Deney Sonucu | 314 | 470 | 1.50 | 29 |
| Standart Değerler (TS 708, 1996) | 220 | 340 | 1.20 | 18 |

Magnezyum Klorür Tuzu

Betonun kalıcılık özelliklerinin belirlenmesi amacı ile planlanan deneylerde Cl^- konsantrasyonu farklı çözeltilerin hazırlanması için özellikleri Çizelge 3.5'te verilen sanayi tipi $MgCl_2$ tuzu kullanılmıştır. Çözeltilerin Cl^- iyon konsantrasyonu Argentometrik yöntem ile deneysel olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.5 $MgCl_2$ tuzunun özellikleri

| Bileşen | % |
|-------------------|-------------|
| $MgCl_2$ | 47.0 |
| $CaCl_2$ | 2.1 |
| $NaCl$ | 0.5 |
| KCl | 0.2 |
| Kristalleşme Suyu | 100'e kadar |

3.2 Numune Üretimi

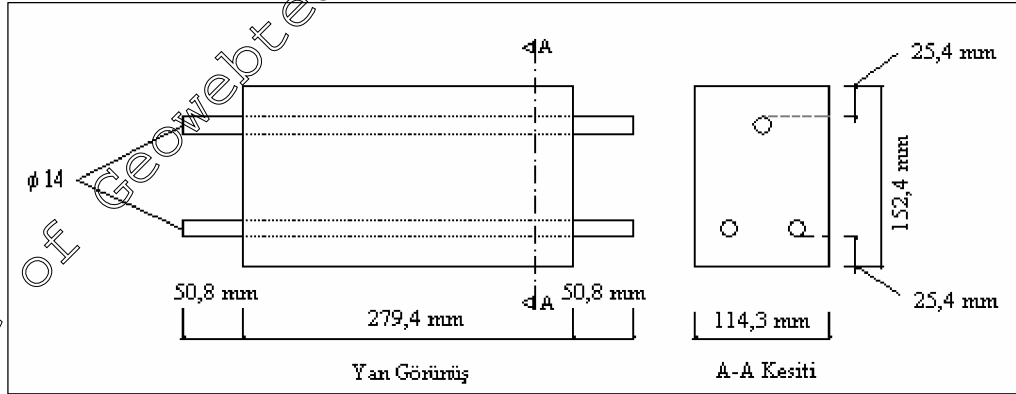
Beton ve betonarme numunelerin üretiminde, çimento dozajı 350 kg/m^3 olan betona, çimento ağırlığının %0 (katkısız), %30 ve %60 oranlarında yüksek fırın cürufu, çimento ile yer değiştirmeli olarak katılmıştır. Üretimde, su/bağlayıcı oranı 0.49 ile sabit tutulmuş, akıcı kıvamdaki betonda ortalama 20 cm'lik çökme, %0.5 oranında süperakışkanlaştırıcı katkı

maddesi ile sağlanmıştır. Özellikleri yukarıda verilen malzemeler ile üretilen betonun karışım oranları ön deneyler ile belirlenmiş, 1 m³ taze beton için gerekli malzeme miktarları ve taze betonun birim ağırlığı Çizelge 3.6’da verilmiştir. Beton üretimi, 50 lt kapasiteli cebri karıştırıcılı betoniyerde gerçekleştirilmiş, taze betonda hava boşluğu oranı TS EN 12350-7 (2002)’ye göre belirlenmiştir. Betonarme numunelerin üretiminde her bir numuneye Şekil 3.2’de görüldüğü gibi 3 adet ϕ 14 düz donatı yerleştirilmiştir.

Çizelge 3.6 1 m³ taze beton için gerekli olan gerçek malzeme miktarları

| Beton Kodu | Çimento Dozajı (kg) | Cüruf (kg) | Su (kg) | Süper Akışkanlaştırıcı | | d _{max} , mm | | | | Δ_{az} (kg/m ³) | Hava Boşluğu Oranı (%) |
|------------|---------------------|------------|---------|------------------------|------|-----------------------|-----|-----|-----|------------------------------------|------------------------|
| | | | | (%) | (kg) | 16 | 12 | 8 | 1 | | |
| | | | | | | (kg) | | | | | |
| C0 | 358 | 0 | 176 | 0.5 | 1.79 | 649 | 556 | 371 | 278 | 2392 | 3.1 |
| C3 | 251 | 107 | 175 | 0.5 | 1.79 | 647 | 554 | 370 | 277 | 2381 | 2.7 |
| C6 | 143 | 214 | 175 | 0.5 | 1.79 | 645 | 553 | 368 | 276 | 2374 | 3.6 |

Bu beton ile 192 adet 100/200 mm boyutlu silindir, 96 adet 150 mm boyutlu küp ve 18 adet ASTM G 109-92 (1992)’ye uygun 279.4x152.4x114.3 mm boyutlu prizma betonarme numune üretilmiştir.



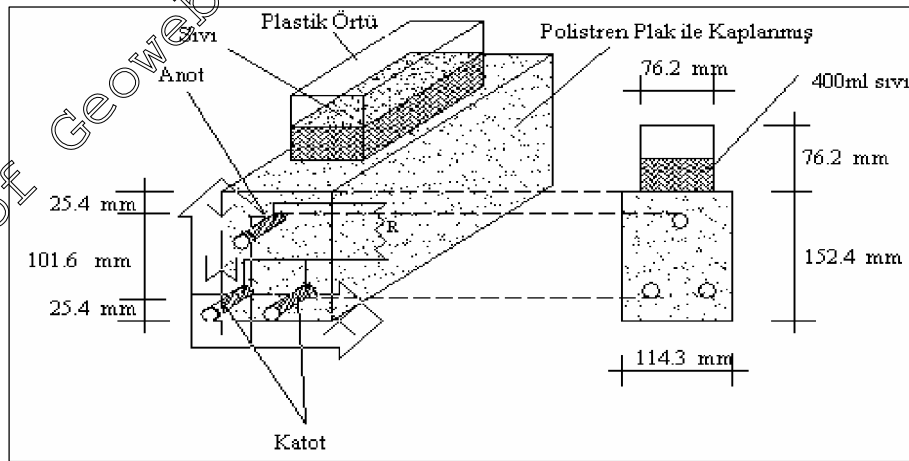
Şekil 3.2 Betonarme numuneler

Beton ve betonarme numuneler YFC oranına, ıslanma-kuruma uygulanan çözeltilerin Cl konsantrasyonuna ve betonarme numunelerin hasarlı-hasarsız oluşuna göre Çizelge 3.7’de görüldüğü gibi kodlanmış, çalışmada Çizelge 3.8’deki deney programı uygulanmıştır.

3.3 Numunelerin Kürü ve Eskitme Süreci

Beton numuneler, üretimden 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış, 28. güne kadar sıcaklığı 20 ± 3 °C olan su içinde kür edilmiştir. Bu günden sonra suda saklanacak olanlar aynı koşullarda bırakılmış, diğer iki grup Cl⁻ iyon konsantrasyonu 10.000 mg/L (M1) ve 40.000 mg/L (M4) olan MgCl₂ çözeltilerine maruz bırakılmıştır. İslanma-kuruma etkisi oluşturmak için beton numuneler, 14 gün sonra sudan ve çözeltilerden çıkarılmış, 14 gün süre ile sıcaklığı 20 ± 3 °C, bağıl nemi $\%60 \pm 5$ olan laboratuvar ortamında tutulmuştur. İslanma-kuruma sürecinde, 14 gün süren ıslanma etkisinden sonra, 14 gün süren kuruma etkisi için geçen 28 gün, 1 çevrim kabul edilmiştir. Buna göre, numune yaşı (t), ıslanma-kuruma sürecinin başlangıcında 28, 1. çevrim sonunda 56, 12. çevrim sonunda 364 ve 15. çevrim sonunda 448 gün olmuştur.

ASTM G 109-92 (1992)'ye uygun olarak üretilen betonarme numuneler, üretimden 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış, 28. güne kadar bağıl nemi yaklaşık $\%100$ olan ortamda kür edilmiştir. İslanma-kuruma sürecinden önce donatıların betonun dışında kalan iki ucu, hava ile temasının kesilmesi için plastik bantla sarılarak kapatılmıştır. Numunelerin herbirinin üzerine Şekil 3.3'te görüldüğü gibi polystren ile hazırlanan 76.2x76.2x152.4 mm boyutlarında havuzcuklar yerleştirilmiştir. Bu havuzcuklardan su sızmasını önlemek amacı ile beton ile polystren havuzcukların birleştiği ayrıntılar silikon yapıştırıcı ile su sızdırmaz hale getirilmiştir. Ayrıca numunelerin alt ve yan yüzeyleri de standartta belirtildiği gibi polystren plaklar ile kapatılarak sızma önlenmiştir.



Şekil 3.3 Betonarme numunelerin ASTM G 109-92 (1992)'ye göre şematik gösterimi

Anot ile katot arasında elektropotansiyel ölçümünün yapılabilmesi için altta bulunan iki donatı, katot kabul edilmiş ve iletken tel ile birleştirilmiştir. Bu katot donatı üstte bulunan

anot donatıya 100 Ω 'luk direnci sabit olan iletken tel ile bağlanmıştır. Eskitme süreci, numune üzerine yerleştirilen havuzcuklara ıslanma sürecinde belirli seviyeye kadar sıvı (su, çözelti) doldurulması, kuruma sürecinde ise sıvının boşaltılması ile gerçekleştirilmiştir. Islanma sürecinde, havuzcuk içindeki sıvının yüzeyi plastik örtü ile kapatılarak buharlaşma engellenmiştir. Bu numunelerde de beton numunelerde olduğu gibi ıslanma-kuruma süreci 28 gün sürmüştür.

Beton ve betonarme numunelerde 28. gün başlangıç kabul edilerek 1, 3, 6, 9, 12 çeyrimlik ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılmak üzere toplam 5 gruba; betonarme numuneler ise 1, 3, 6, 9, 12 ve 15 çeyrimlik ıslanma-kurumaya maruz bırakılmak üzere toplam 6 gruba ayrılmıştır.

Çizelge 3.7 Numune kodlarının açıklamaları

| | YFC | Kod | Açıklama |
|---------------------|------------------|---------|--|
| BETON NUMUNELER | YFC Katkısız | C0-C | 28 gün suda kür edilmiş beton numuneler (Kontrol) |
| | | C0W | Suda ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan beton numuneler |
| | | C0M1 | Cl ⁻ konsantrasyonu 10.000 mg/L olan MgCl ₂ çözeltisinde ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan beton numuneler |
| | | C0M4 | Cl ⁻ konsantrasyonu 40.000 mg/L olan MgCl ₂ çözeltisinde ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan beton numuneler |
| | % 30 YFC Katkılı | C3-C | 28 gün suda kür edilmiş beton numuneler |
| | | C3W | Suda ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan beton numuneler |
| | | C3M1 | % Cl ⁻ konsantrasyonu 10.000 mg/L olan MgCl ₂ çözeltisinde ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan beton numuneler |
| | | C3M4 | Cl ⁻ konsantrasyonu 40.000 mg/L olan MgCl ₂ çözeltisinde ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan beton numuneler |
| | % 60 YFC Katkılı | C6-C | 28 gün suda kür edilmiş beton numuneler |
| | | C6W | Suda ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan beton numuneler |
| | | C6M1 | Cl ⁻ konsantrasyonu 10.000 mg/L olan MgCl ₂ çözeltisinde ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan beton numuneler |
| | | C6M4 | Cl ⁻ konsantrasyonu 40.000 mg/L olan MgCl ₂ çözeltisinde ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan beton numuneler |
| BETONARME NUMUNELER | YFC Katkısız | RC0W-1 | Suda ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan betonarme numuneler (Hasar oluşturulmuş) |
| | | RC0W-2 | Suda ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan betonarme numuneler |
| | | RC0M1-1 | Cl ⁻ konsantrasyonu 10.000 mg/L olan MgCl ₂ çözeltisinde ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan betonarme numuneler (Hasar oluşturulmuş) |
| | | RC0M1-2 | Cl ⁻ konsantrasyonu 10.000 mg/L olan MgCl ₂ çözeltisinde ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan betonarme numuneler |
| | | RC0M4-1 | Cl ⁻ konsantrasyonu 40.000 mg/L olan MgCl ₂ çözeltisinde ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan betonarme numuneler (Hasar oluşturulmuş) |
| | | RC0M4-2 | Cl ⁻ konsantrasyonu 40.000 mg/L olan MgCl ₂ çözeltisinde ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan betonarme numuneler |
| | % 30 YFC Katkılı | RC3W-1 | Suda ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan betonarme numuneler (Hasar oluşturulmuş) |
| | | RC3W-2 | Suda ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan betonarme numuneler |
| | | RC3M1-1 | Cl ⁻ konsantrasyonu 10.000 mg/L olan MgCl ₂ çözeltisinde ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan betonarme numuneler (Hasar oluşturulmuş) |
| | | RC3M1-2 | Cl ⁻ konsantrasyonu 10.000 mg/L olan MgCl ₂ çözeltisinde ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan betonarme numuneler |
| | | RC3M4-1 | Cl ⁻ konsantrasyonu 40.000 mg/L olan MgCl ₂ çözeltisinde ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan betonarme numuneler (Hasar oluşturulmuş) |
| | | RC3M4-2 | Cl ⁻ konsantrasyonu 40.000 mg/L olan MgCl ₂ çözeltisinde ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan betonarme numuneler |
| | % 60 YFC Katkılı | RC6W-1 | Suda ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan betonarme numuneler (Hasar oluşturulmuş) |
| | | RC6W-2 | Suda ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan betonarme numuneler |
| | | RC6M1-1 | Cl ⁻ konsantrasyonu 10.000 mg/L olan MgCl ₂ çözeltisinde ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan betonarme numuneler (Hasar oluşturulmuş) |
| | | RC6M1-2 | Cl ⁻ konsantrasyonu 10.000 mg/L olan MgCl ₂ çözeltisinde ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan betonarme numuneler |
| | | RC6M4-1 | Cl ⁻ konsantrasyonu 40.000 mg/L olan MgCl ₂ çözeltisinde ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan betonarme numuneler (Hasar oluşturulmuş) |
| | | RC6M4-2 | Cl ⁻ konsantrasyonu 40.000 mg/L olan MgCl ₂ çözeltisinde ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan betonarme numuneler |

Çizelge 3.8 Deneysel programı

| Numune | YFC İçeriği | Numune Kodları | Basınç Deneyi | Yarma Deneyi | Basınçlı Su İşleme Derinliği Deneyi | Ağırlık Değişimi | Ultrasess Deneyi | Birim Ağırlık Tayini | Karbonatlaşma Derinliği Tayini | Cl ⁻ Tayini | Yarı Hücre Potansiyeli Ölçümü | Makro Hücre Potansiyeli Ölçümü | Donatı Deneyleri | | | | | | |
|-----------------|-----------------|----------------|---------------|--------------|-------------------------------------|------------------|------------------|----------------------|--------------------------------|------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------|-----------------------------|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | | | Ağırlık Kaybı | Korozyon Bölgesi İncelemesi | | | | | |
| BETON | YFC Katkısız | C0W | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | | | | | | | | | |
| | | C0M1 | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | | | | | | | | | |
| | | C0M4 | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | | | | | | | | | |
| | %30 YFC Katkılı | C3W | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | | | | | | | | | |
| | | C3M1 | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | | | | | | | | | |
| | | C3M4 | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | | | | | | | | | |
| | %60 YFC Katkılı | C6W | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | | | | | | | | | |
| | | C6M1 | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | | | | | | | | | |
| | | C6M4 | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | | | | | | | | | |
| | BETONARME | YFC Katkısız | RC0W | | | | | | | √ | | | | | √ | √ | √ | √ | √ |
| | | | RC0M1 | | | | | | | √ | | | | | √ | √ | √ | √ | √ |
| | | | RC0M4 | | | | | | | √ | | | | | √ | √ | √ | √ | √ |
| %30 YFC Katkılı | | RC3W | | | | | | | | √ | √ | √ | √ | √ | √ | | | | |
| | | RC3M1 | | | | | | | | √ | √ | √ | √ | √ | √ | | | | |
| | | RC3M4 | | | | | | | | √ | √ | √ | √ | √ | √ | | | | |
| %60 YFC Katkılı | | RC6W | | | | | | | | √ | √ | √ | √ | √ | √ | | | | |
| | | RC6M1 | | | | | | | | √ | √ | √ | √ | √ | √ | | | | |
| | | RC6M4 | | | | | | | | √ | √ | √ | √ | √ | √ | | | | |

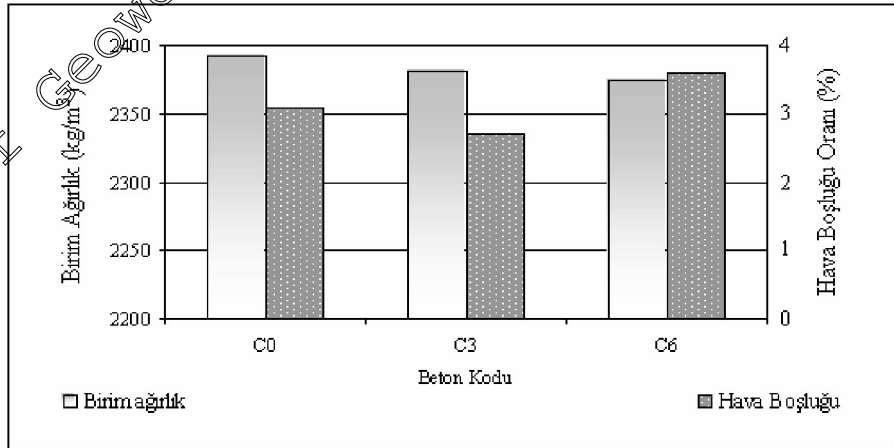
3.4 Kontrol Deneyleri

Betona farklı oranlarda yüksek fırın cürufu (YFC) katılmasının beton özelliklerine, beton ve betonarmenin dayanıklılığına etkisini araştırmak amacı ile gerçekleştirilen deneysel çalışma kapsamında beton ve betonarme numuneler üretilmiş, gerekli deney ve ölçümler yapılmıştır. Buna göre;

Taze betonda çökme, birim ağırlık, hava boşluğu oranı tayini, sertleşmiş betonda, başlangıçta ve ıslanma-kuruma çevrimlerinin belirli sayılarından sonra birim ağırlık, ses geçiş süresi, ağırlıkça ve hacimce su emme, basınçlı su işleme derinliği, karbonatlaşma derinliği, Cl difüzyonu, basınç ve yarma deneyleri yapılmış, betonarme numunelerde yarı hücre ve makro-hücre potansiyel ölçümleri, Cl difüzyonu ve karbonatlaşma derinliği tayini yapılmış, çıkarılan donatılarda, ağırlık kaybı ve korozyon bölgesi uzunluğu belirlenmiştir. Bu deneyler ile ilgili açıklamalar aşağıda verilmiştir.

3.4.1 Beton Numunelerde Yapılan Deneyler

Beton ve betonarme numunelerin üretiminde istenen işlenebilmenin kontrolü için her üretimde öncelikle taze betonda çökme deneyi (TS EN 12350-2, 2002) yapılmış, akıcı kıvam için gerekli olan 20 cm'lik çökme sağlanmış, taze betonda ayrıca birim ağırlık (TS EN 12350-6, 2002) ve hava boşluğu tayini (TS EN 12350-7, 2002) deneyleri yapılmıştır. Taze betona ait birim ağırlık ve hava boşluğu oranlarının ortalama değerleri Çizelge 3.6'da, birim ağırlığın ve hava boşluğunun YFC oranına göre değişimi Şekil 3.4'te verilmiştir.

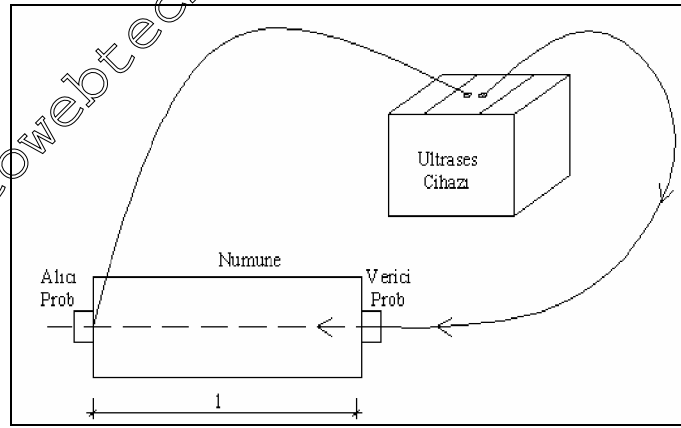


Şekil 3.4 Taze betonlarda birim ağırlık ve hava boşluğu oranının YFC oranı ile değişimi

Beton özelliklerinin ve farklı CI konsantrasyonundaki çözeltiler ile gerçekleştirilen ıslanma kuruma etkisinin araştırılması amacı ile tüm numuneler 28. güne kadar sıcaklığı 20 ± 3 °C olan su içinde kür edilmiştir. Eskitme sürecinde 28.gün başlangıç (0) kabul edilmiş, 1., 3., 6., 9. ve 12. çevrimlerden sonra ağırlık ve ultrases ölçümü, su emme deneyleri, basınçlı su işleme derinliği deneyi, basınç ve yarma deneyleri, karbonatlaşma derinliği ve klorür konsantrasyonu tayini deneyleri yapılmıştır. Deneyler ile ilgili açıklamalar deneylerin yapılış sırasına göre aşağıda verilmiştir.

3.4.1.1 Ağırlık ve Ultrases Ölçümü

Birim ağırlığı (TS EN 12390-8, 2002) belirlemek amacı ile tüm numuneler, başlangıçta ve her bir ıslanma-kuruma çevriminden sonra 4 kg kapasiteli 0.1 g duyarlıklı terazide tartılmıştır. Numunelerin hacmi, geometrik olarak hesaplanmış, ağırlığın hacme oranı ile birim ağırlıkları (Δ , kg/dm³) belirlenmiştir. Aynı numunelerde daha sonra frekansı 55 kHz, modeli ASTM 597-02 (2002) ve BS 1881 Part 203 (1986)'ya uygun olan ultrases aleti ile Şekil 3.5'te görüldüğü gibi ses geçiş süresi (t, μ s) ölçülmüştür. Ölçümlerde direkt iletim yöntemi uygulanmış, ölçümler problar yer değiştirilerek 2 kez tekrarlanmıştır. Ölçüm yapılan numune boyutunun, okunan sürenin (t, μ s) ortalamasına oranlanması ile ses geçiş hızı (V, m/sn) hesaplanmış, sonuçlar Çizelge Ek 1-3'de verilmiştir.



Şekil 3.5 Beton numunelerde ses geçiş süresinin ölçümü

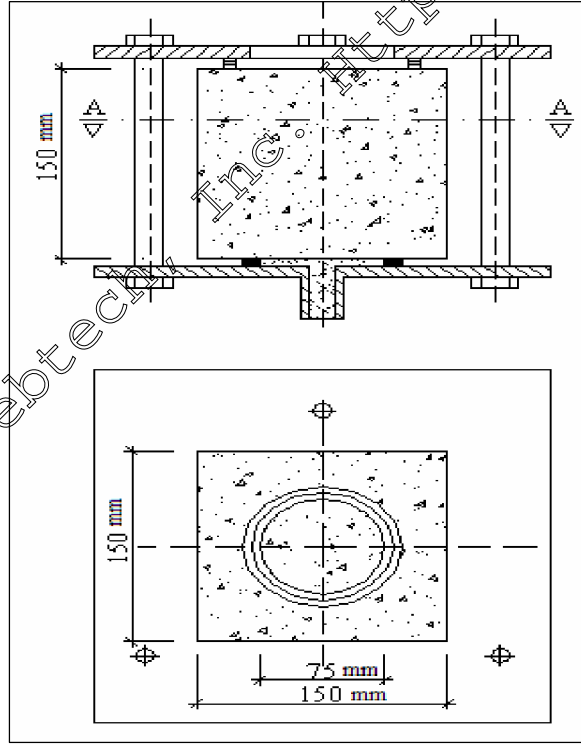
3.4.1.2 Ağırlıkça ve Hacimce Su Emme Deneyleri

Farklı oranlarda yüksek fırın cürufu katkılı beton numunelerde ağırlıkça ve hacimce su emme değerlerini belirlemek amacı ile başlangıçta, 1., 3., 6., 9. ve 12. çevrimlerden sonra ağırlıkça

ve hacimce su emme deneyleri yapılmış ve $%a_s$ ve $%h_s$ değerleri belirlenmiş, ortalama değerleri Çizelge Ek 1-3'te verilmiştir.

3.4.1.3 Basınçlı Su İşleme Deneyi

Yukarıda belirtildiği gibi ıslanma-kuruma çevrimi tamamlanan 15 cm boyutlu küp numunelerde basınçlı su işleme deneyi TS EN 12390-8 (2002)'den yararlanılarak yapılmıştır. Numuneler, Şekil 3.6 ve Şekil Ek 1a ve 1b'de görüldüğü gibi, üst yüzeyinden 24 saat süre ile 800 kPa basınçlı suya maruz bırakılmıştır. 24 saat sonra düzenden çıkarılan numunelerin su uygulanan yüzeyindeki fazla su silinerek temizlenmiş, numune tartılmış ve su uygulanan yüzeye dik şekilde ortasından yarılmıştır. Şekil Ek 1c'de görüldüğü gibi ikiye ayrılan numunenin basınçlı su uygulanan yüzeyinden itibaren su işleme derinliği (h_w , mm) ölçülmüş, maksimum ve minimum değerleri belirlenmiştir. Su işleme derinliğinin ortalama değeri Çizelge Ek 1-3'de verilmiştir.



Şekil 3.6 Basınçlı su işleme deney düzeneği (TS EN 12390-8, 2002)

3.4.1.4 Basınç Deneyi

Beton numunelerde başlangıçta ve ıslanma-kuruma çevrimi tamamlandıktan sonra basınç deneyi yapılmıştır. Deney, 100/200 mm boyutlu silindir numunelerde 3000 kN kapasiteli Auto Test basınç aletinde 2.4 kN/s sabit yükleme hızı ile Şekil Ek 2'de görülen basınç deney

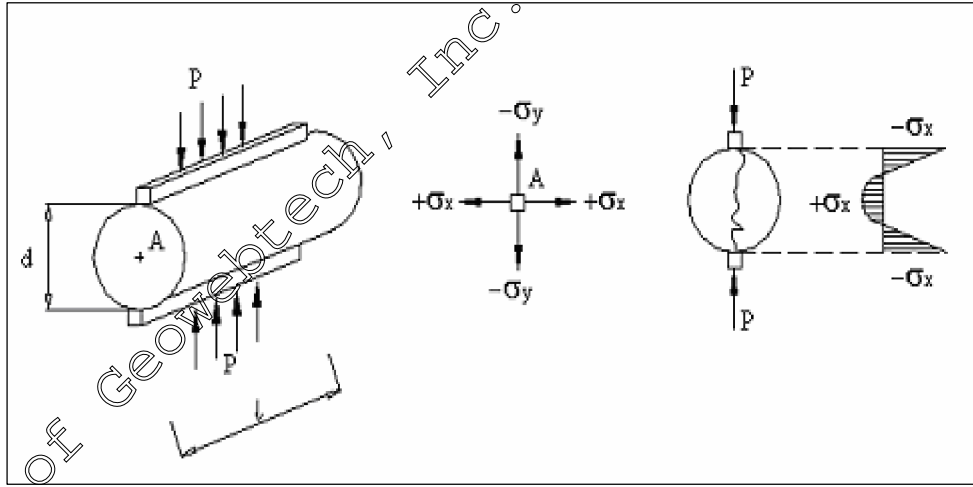
düzeneğinde TS EN 12390-3 (2002)'e uygun olarak gerçekleştirilmiş, kırma yükü (P_k , kN) belirlenmiştir. Basınç dayanımının (f_c , MPa) ortalama değerleri Çizelge Ek 1-3'de verilmiştir.

3.4.1.5 Yarma Deneyi

Betonun çekme dayanımını belirlemek amacı ile başlangıçta, 1., 3., 6., 9. ve 12. çevrimlerden sonra Şekil 3.7 ve Şekil Ek 3'de görüldüğü gibi BS 1881: Part 117 (1983)'ye uygun olarak geliştirilen deney düzeneğinde yarma deneyi yapılmıştır. Yarma deneyi toplam 96 adet 100/200 mm boyutlu silindir numunede 3000 kN kapasiteli üniversal basınç aletinde 0.8 kN/s lik sabit yükleme hızı ile gerçekleştirilmiş, kırma yükü (P_k , kN) belirlenmiş, yarma dayanımı (f_{cts} , N/mm²) 3.1 bağıntısı ile hesaplanmış, yarma dayanımının ortalama değeri Çizelge Ek 1-3'de verilmiştir.

$$f_{cts} = \frac{2P_k}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (3.1)$$

Bağıntıda, f_{cts} (N/mm²) yarma dayanımını; P_k (N) kırma kuvvetini; d (mm) numune çapını ve l (mm) numune boyunu ifade etmektedir.



Şekil 3.7 Yarma deney düzeneği

3.4.1.6 Karbonatlaşma Derinliğinin Ölçümü

Karbonatlaşma derinliğini belirlemek amacı ile beton numunelerde başlangıçta, 1., 3., 6., 9. ve 12. çevrimlerden sonra yapılan yarma deneyinde iki yarım silindir parçaya ayrılan numunelerden bir tanesinde kırılan numune yüzeyine zaman kaybetmeden fenolftalein çözeltisi püskürtülmüştür. %1'lik fenolftalein çözeltisi indikatör olarak pH'ı 8.2-9.8 olan fenolftalein ve etil alkol ile hazırlanmıştır. Çözelti püskürtüldükten hemen sonra, Şekil Ek 4'te görüldüğü gibi kırık beton yüzeyinde kırmızı-mor renge dönüşen

karbonatlaşmamış ve yüzeyden itibaren rengi değişmeyen karbonatlaşmış olmak üzere iki bölge oluşmuştur. Karbonatlaşma derinliği (d_c , mm) 10 değişik noktadan ölçülmüş, ortalama değerler Çizelge Ek 1-3'te verilmiştir.

3.4.1.7 Cl⁻ Konsantrasyonu Tayini Deneyi

Yarma deneyi sonucunda elde edilen diğer yarım silindir parçada Şekil 3.8'de görüldüğü gibi, yüzeyden itibaren 0-10 mm, 20-30 mm ve 45-50 mm'lik derinliklerden ucu 7 mm çaplı matkap yardımı ile Ek Şekil 5'te görüldüğü gibi toz çıkarılmıştır. Çıkarılan toz 600 µm elekten elenmiş ve suda çözünen Cl⁻ tayini yapılmak üzere numuneler hazırlanmıştır (Şekil Ek 6). Bu toz numunelerde Argentometrik yöntem ile Cl⁻ iyon konsantrasyonu (mg/L) harcanan gümüş nitrat çözeltisinden ve 3.2 bağıntısından yararlanılarak hesaplanmıştır.

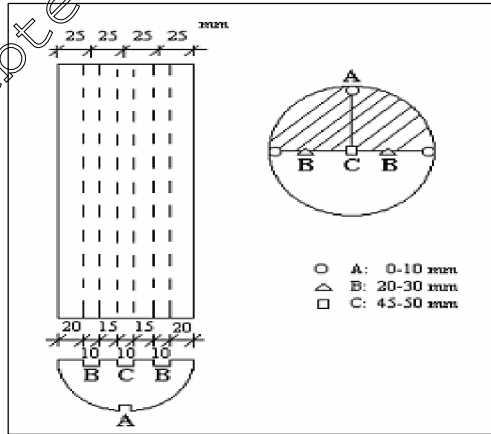
$$\text{mg Cl}^- / \text{L} = \frac{(\alpha_A - \alpha_B) \cdot N \cdot 35450}{50 \text{mL}} \quad (3.2)$$

α_A = Numune için harcanan gümüş nitrat (mL)

α_B = Destile su için harcanan gümüş nitrat (mL)

N = Gümüş nitratın normalitesi (0.0141 N)

Beton numunelerde belirlenen klorür konsantrasyonunun 3 farklı derinlik için ortalama değerleri Çizelge Ek 1-3'te verilmiştir.



Şekil 3.8 Beton numunelerde klorür tayini için toz numune alınan bölgeler

3.4.2 Betonarme Numunelerde Yapılan Deneyler

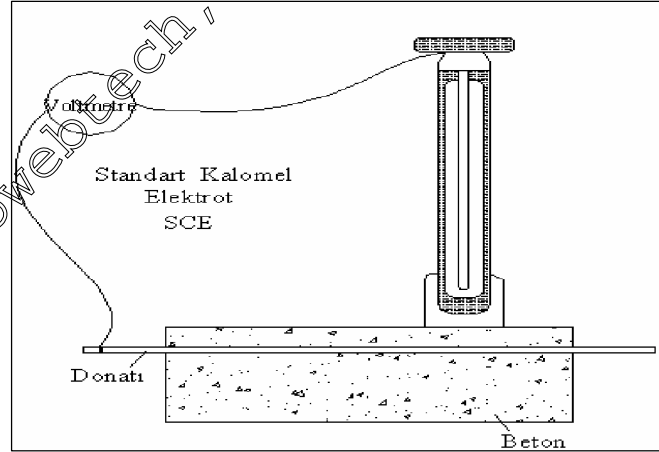
Betonarme elemanlarda donatı korozyonunu araştırmak amacı ile ASTM G 109-92 (1992)'ye uygun olarak hazırlanan (Şekil 3.3) numunelerde, beton numunelere benzer ıslanma-kuruma çevrimi uygulanmıştır. Bu numunelerde çevrim süresinden bağımsız olarak 1 hafta ara ile

yarı-hücre ve makro-hücre potansiyelleri ölçülmüştür. Her çevrimde 4 ölçüm olmak üzere toplam 60 ölçüm yapılmıştır. Betonarme numunelerde hasarlı yapıyı temsil etmek üzere betonarme numunelerin 1 tanesinde 30. haftada, çözeltilerin konulduğu havuzcukların içine matkap kullanılarak delik açmak sureti ile hasar oluşturulmuştur. Tüm betonarme numunelerde 15. çevrim sonunda 0-10 mm, 10-20 mm ve 20-30 mm derinliklerinden klorür tayini yapılmak üzere toz numuneler çıkarılmış ve farklı derinliklerde klorür konsantrasyonları belirlenmiştir. Daha sonra betonarme numuneler kırılarak içerisindeki donatılar çıkarılmıştır. Kırılan parçalarda, havuzcukların rastladığı bölgede beton numunelerde olduğu gibi zaman kaybetmeden karbonatlaşma derinliği belirlenmiştir.

Betonarme numunelerden kırılarak çıkarılan donatılar gözle incelenmiş, korozyon oluşan bölgenin uzunluğu ve ağırlık kaybı ölçümleri yapılmıştır.

3.4.2.1 Yarı-Hücre Potansiyeli Ölçümü

Betonarme numunelerde donatı korozyonunun izlenmesi için 1 hafta ara ile Şekil 3.9'da görülen deney düzeneğinde anot kabul edilen donatı, standart kalomel elektroda (SCE) göre yarı-hücre potansiyeli 0.1 mV duyarlıklı multimetre ile (E, mV) ASTM C876-91 (1991)'e uygun olarak Şekil Ek 7c de görüldüğü gibi ölçülmüştür.

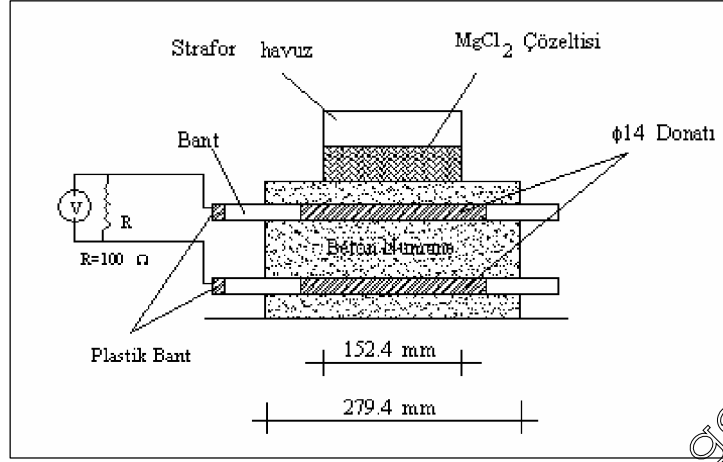


Şekil 3.9 Yarı-hücre potansiyelinin ölçümü

3.4.2.2 Makro-Hücre Potansiyeli Ölçümü

Betonarme numunelerde korozyon gelişiminin izlenmesi için 28 günlük kür süresinin sonunda Şekil 3.10'da görüldüğü üzere deney düzeneği hazırlanmış ve anot ile katot arasında oluşturulan 100 Ω ' luk sabit dirençte oluşan elektro-potansiyel fark (E, mV), 60 haftalık

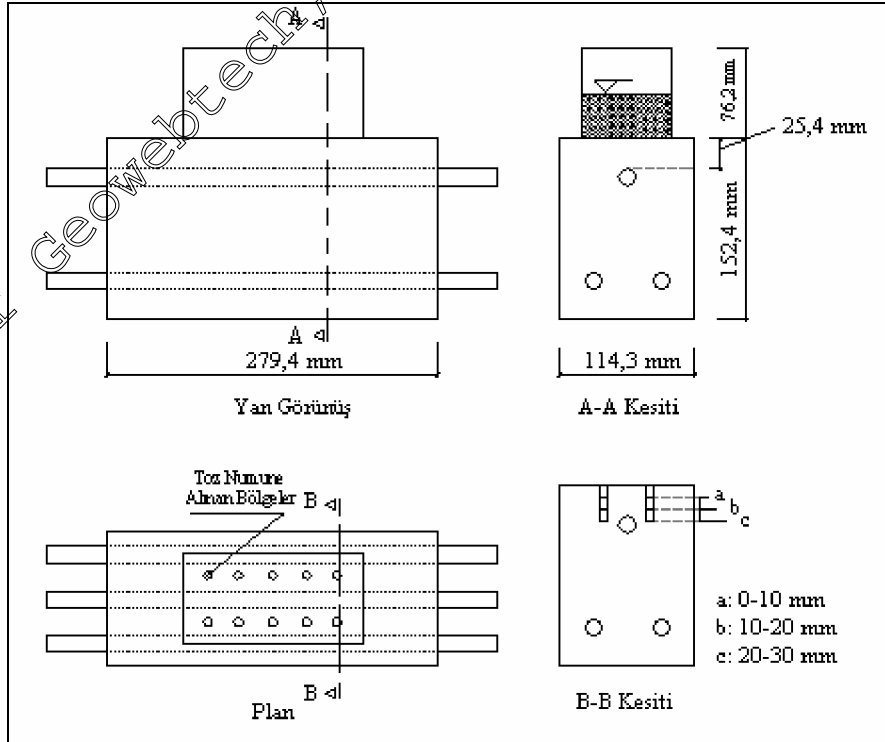
deney süresince 1'er haftalık periyotlarla Şekil Ek 7d'de görüldüğü gibi ölçülmüştür. Potansiyel fark ölçümünde 0.01 mV duyarlıklı yüksek empedanslı multimetre kullanılmıştır.



Şekil 3.10 Betonarme numunelerde elektropotansiyel ölçümü

3.4.2.3 Cl⁻ Konsantrasyonu Tayini Deneyi

Betonarme numunelerde 15. çevrim sonunda Şekil 3.10'de görüldüğü gibi 0-10 mm, 10-20 mm ve 20-30 mm derinliklerden, ucu 7 mm çaplı matkap yardımı ile toz beton numunelerdekine benzer şekilde çıkarılmış, Cl⁻ tayini yapılmıştır. Klorür konsantrasyonunun 3 farklı derinlik için ortalama değerleri Çizelge Ek 7 'de verilmiştir.



Şekil 3.11 Betonarme numunelerde klorür tayini için toz numune alınan bölgeler

3.4.2.4 Karbonatlaşma Derinliğinin Ölçümü

Betonarme numunelerde karbonatlaşma derinliği (d_c ,mm), 15. çevrimden sonra beton numunelerde olduğu gibi 10 değişik noktadan ölçülmüş, karbonatlaşma derinliğinin ortalama değerleri Çizelge Ek 7’de verilmiştir.

3.4.2.5 Çıkarılan Donatıların İncelenmesi

Betonarme numunelerde 15. ıslanma-kuruma çevrimin tamamlamasından sonra numuneler kırılmış, içerisindeki donatılar çıkarılmış, yüzeyleri çıplak göz ile incelenmiştir. Yapılan incelemelerde, hasarsız numunelere ait hiçbir donatıda, hasarlı numunelere ait katot durumundaki donatılarda herhangi bir paslanma ve/veya korozyon ürünü gözlenmemiş, hasarlı numunelere ait anot konumundaki donatılarda hasarlı bölge etrafında Şekil 4.41’de görüldüğü gibi korozyon oluşmuştur. Korozyon oluşan bölgenin uzunluğu ölçülmüş, korozyon oluşan bu donatılar, 1000mL HCl, 24 gr Sb_2O_3 ve 1.3 gr $SnCl_2 \cdot 2H_2O$ ’dan oluşan Clark çözeltisi ile temizlenmiş, 0.1 gr. duyarlıklı terazide tartılarak son ağırlık belirlenmiştir. Donatılarda ağırlık kaybı oranı değerleri ve korozyon oluşan bölgenin boyu Çizelge Ek 7’de verilmiştir.

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Yüksek fırın cürufunun betonun ve betonarmenin kalıcılığına etkisinin araştırıldığı bu çalışmada öncelikle deneylerden alınan veriler ile gerekli hesaplamalar yapılmış, ortalama değerler belirlenmiş, bu değerlerin zamana bağlı değişimi, betona katılan yüksek fırın cürufu oranına ve çözeltilerin Cl konsantrasyonuna göre değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmada ıslanma-kuruma süreci, Bölüm 3.3'te açıklandığı gibi 28. günde başlatılmış, betonun yaşı (t), ıslanma-kuruma sürecinin başlangıcında 28, birinci çevrim sonunda 56, 12. çevrim sonunda 364 ve 15. çevrim sonunda 448 gün olmuştur.

4.1 Fiziksel Özelliklerin Değerlendirilmesi

Betonda ve betonarme numunelerde yapılan deneylerden elde edilen birim ağırlık, ses geçiş hızı, su emme ve basınçlı su işleme derinliği gibi fiziksel özellikler ile ilgili değerlendirmeler aşağıda verilmiştir.

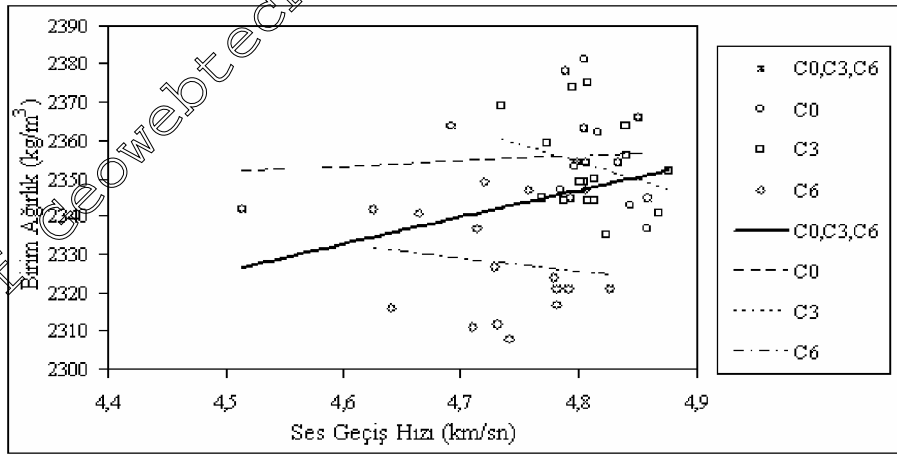
4.1.1 Birim Ağırlık ve Ses Geçiş Hızı

Farklı oranlarda cüruf (C0, C3, C6) katılarak üretilen ve farklı Cl konsantrasyonundaki çözeltiler (W, M1, M4) ile ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılan beton gruplarına ait birim ağırlığın ortalama değerleri, çevrim sayısına bağlı olarak Çizelge Ek 1, 2 ve 3'te verilmiştir. Buna göre;

Standart koşullarda kür edilen kontrol grubu betonların 28. gündeki ortalama birim ağırlığı C0 grubunda 2369 kg/m^3 , C3 grubunda 2354 kg/m^3 ve C6 grubunda 2342 kg/m^3 'dür. Birim ağırlık değerleri eskime sürecinden bağımsız olarak incelendiğinde; C0 grubunda en düşük 2337 kg/m^3 , en yüksek 2381 kg/m^3 iken, C3 grubu betonlarda en düşük 2335 kg/m^3 , en yüksek 2375 kg/m^3 , C6 grubu betonlarda en düşük 2308 kg/m^3 , en yüksek 2349 kg/m^3 değerlerindedir. Her üç gruba ait birim ağırlık değerleri, normal betonlar için verilen 2200 ile 2400 kg/m^3 değerleri arasında kalmaktadır. Yüksek fırın cürufu katılmamış C0 grubunun ortalama birim ağırlığı, yüksek fırın cürufu katılmış olan C3 ve C6 gruplarına kıyasla daha yüksek değerler almıştır. Yüksek fırın cürufunun özgül ağırlığı çimentonunkinden yaklaşık %8 daha az olduğundan ve puzolanlar taze betonda boşluk oranını arttırdığından, cüruf oranının artışı ile birim ağırlık değerleri beklendiği gibi düşüktür. Türkmen vd. (2003) tarafından normal Portland çimentosu, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı kullanılarak üç farklı su/bağlayıcı oranı ile üretilen betonlarda, cüruf ve silis dumanı kullanılması ile birim

ağırlıkların azaldığı, bu durumun da cüruf ve silis dumanının özgül ağırlığının Portland çimentosundan daha düşük olmasından kaynaklandığı ifade edilmektedir.

Beton gruplarına ait ses geçiş hızı değerleri çevrim sayısı ve zamana bağlı olarak Çizelge Ek 1, 2 ve 3'te verilmiştir. Başlangıçtaki (28. gündeki) ses geçiş hızlarının C0 grubunda 4.8 km/sn, C3 grubunda 4.7 km/sn ve C6 grubunda 4.6 km/sn olduğu görülmektedir. Bu değerler karşılaştırıldığında, C3 ve C6 gruplarının ses geçiş hızının başlangıçta C0 grubununkinden daha düşük olduğu, cüruf oranının artması ile hızın düştüğü, ileri yaşlarda ise durumun değiştiği görülmüştür; Gruplara ait ses geçiş hızı, C0 grubunda en düşük 4.5 km/sn, en yüksek 4.9 km/sn iken, C3 grubunda en düşük 4.7 km/sn, en yüksek 4.9 km/sn ve C6 grubu betonlarda ise en düşük 4.6 km/sn, en yüksek 4.8 km/sn değerlerinde ve cüruf katkılı betonların ortalama ses geçiş hızı, katkısız grubun ses geçiş hızından C3 grubunda %2.5, C6 grubunda %1.7 daha yüksektir. Bu verilere göre, yüksek fırın cürufu katkılı ve katkısız betonların tamamı mükemmel beton için verilen 4.5 km/sn değerinin üstündedir (Neville, 1990). Neville'in Whitehurs'a atıf yaparak belirttiği üzere; yoğunluğu yaklaşık 2400 kg/m^3 , ses geçiş hızı 4.5 km/sn değerinden daha büyük olan betonlar mükemmel, 3.5-4.5 km/sn arasında olan betonlar iyi, 3.0-3.5 km/sn arasında olanlar şüpheli, 2.0-3.0 km/sn arasında olan betonların kötü ve 2.0 km/sn değerinden daha düşük olanlar ise çok kötü kalitededir. Ayrıca Neville Jones'a atıf yaparak, iyi kalitedeki beton için en düşük ses geçiş hızı limit değerinin 4.1 ile 4.7 km/sn arasında olduğuna işaret etmektedir (Neville, 1990).



Şekil 4.1 Beton numunelerde birim ağırlık-ses geçiş hızı ilişkisi

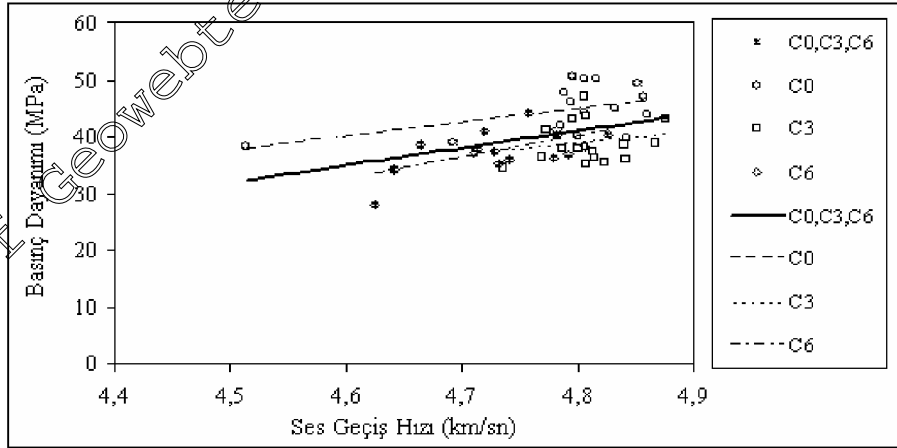
Suda ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılan numunelerden C0 grubunun ses geçiş hızında 12. tekrar sonunda önemli bir değişim olmadığı, C3 grubunda %1.48 ve C6 grubunda %2 oranında artış olduğu görülmüştür. Farklı Cİ konsantrasyonundaki çözeltiler ile ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılan betonlarda 12. çevrim sonunda M1 serisinin C0 grubunda

%0.1, C3 grubunda %1.2 ve C6 grubunda %2.8 oranında artış, M4 serisinin C0 grubunda %0.2'lik azalma, C3 grubunda %1.5, C6 grubunda %0.8'lik artış gözlenmiştir.

Bu verilere göre, Şekil 4.1'de görüldüğü gibi, bu çalışmada üretilen betonların tamamı mükemmel beton sınıfına girmektedir. Tüm gruplar (C0, C3, C6) için yapılan regresyon analizinden, birim ağırlık ile ses geçiş hızı arasındaki ilişkinin lineer olduğu, birim ağırlık arttıkça ses geçiş hızının da arttığı görülmüştür. Bu iki fiziksel büyüklük arasındaki ilişkilere ait istatistiksel bağıntılar Çizelge Ek 8'de verilmiştir.

Bu veriler değerlendirildiğinde, cüruf katkılı ve katkısız betonlarda su etkisinde hidrasyonun sürdüğü ve boşlukların azaldığı, CI etkisinde yüksek konsantrasyonlarda bile betona katılan cürufun olumlu etki yaptığı, boşluk oluşumunu engellediği anlaşılmaktadır. Başlangıçta ve eskitmeden sonra betonların tümünde ses geçiş hızı değerleri, yukarıda işaret edildiği gibi mükemmel beton için verilen değer üstündedir. Bu durum, tekrarlı ıslanma-kuruma etkisinde hidrasyonun sürdüğünün bir göstergesidir.

Beton numunelerde basınç dayanımı ile ses geçiş hızı arasındaki ilişkinin eskitme sürecinden bağımsız olarak cüruf oranına bağımlı ve bağımsız olarak araştırıldığı Şekil 4.2'de; tüm numunelerin ses geçiş hızının 4.5 km/sn ile 4.9 km/sn arasında olduğu görülmektedir. Numunelerin basınç dayanımı ile ses geçiş hızı arasında Şekil 4.2'de görüldüğü gibi, ses geçiş hızı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki lineerdir. Bu iki büyüklük arasındaki ilişkilere ait istatistiksel bağıntılar Çizelge Ek 9'da verilmiştir.



Şekil 4.2 Beton numunelerde basınç dayanımı-ses geçiş hızı ilişkisi

Karışım oranları farklı beton küp numunelerde yapılan bir çalışmada, ses geçiş hızı ile basınç dayanımı arasındaki ilişkinin doğru orantılı olduğu, aynı yaştaki betonlarda, agrega/çimento oranı ve su/çimento oranının birbirini dengelediği ifade edilmektedir. İşlenebilmesi sabit, belirli yaştaki betonlarda ses geçiş hızı ile dayanım arasında tek bir ilişkinin bulunduğu

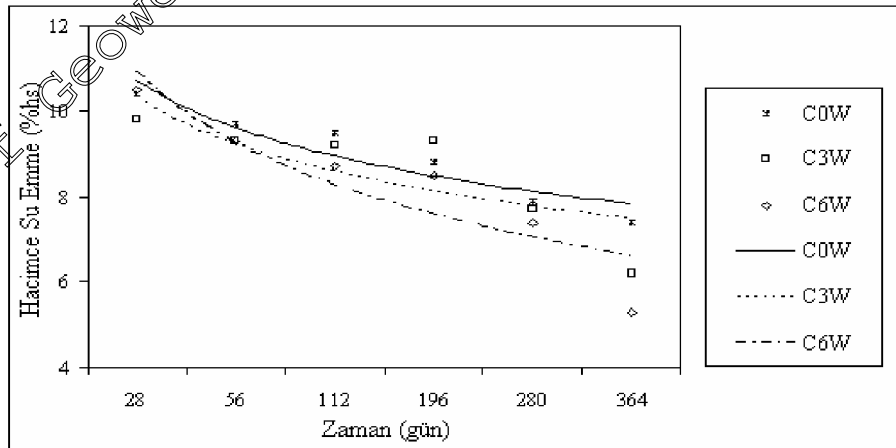
işaret edilmektedir (Neville, 1990). Aynı ses geçiş hızına sahip betonlarda en yüksek basınç dayanımı cüruf katkısız numunelerde elde edilirken cüruf katkılılarda basınç dayanımları birbirine yakın değerlerdedir.

4.1.2 Su Emme Özelliği

Beton gruplarına (C0, C3, C6) ve eskitme sürecine göre (W, M1, M4) ağırlıkça ve hacimce su emme değerleri çevrim sayısı ve zamana bağlı olarak Çizelge Ek 1, 2 ve 3'te, hacimce su emme oranının zamanla değişimi ile ilgili istatistiksel bağıntılar ve bu bağıntılara ait korelasyon katsayıları Çizelge Ek 10'da verilmiştir. Zahiri porozitenin bir göstergesi olan hacimce su emmenin zamanla değişimi ($\%h_s-t$) Şekil 4.3-4.5'te verilmiştir. Çizelge ve şekiller incelendiğinde, cüruf katkılı ve katkısız tüm betonlarda zamanla ve cüruf oranının artması ile boşlukların azaldığı görülmüştür. Boşlukların azalması, 364 gün (12 çevrim) süre ile hidrasyonun sürdüğünün bir göstergesidir.

Kontrol serileri incelendiğinde hacimce su emme, başlangıçta (28. gün), C0 grubunda %10.4, C3 grubunda %9.8 ve C6 grubunda %10.5 değerlerindedir.

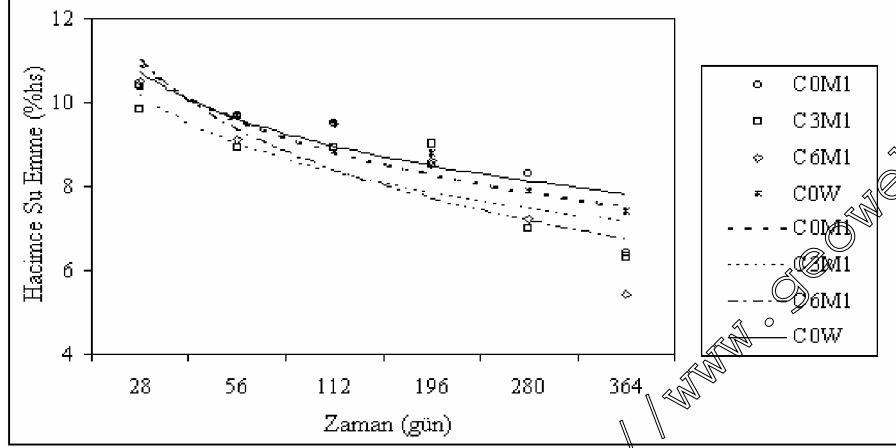
Hacimce su emme oranı eskitme sürecinden ve çözeltilerin CI konsantrasyonundan bağımsız olarak ele alındığında Çizelge Ek 1, 2 ve 3'te görüldüğü gibi, C0 grubunda en büyük %10.4, en küçük %6.4, C3 grubunda en büyük %9.8, en küçük %6.2 ve C6 grubunda en büyük %10.5, en küçük %5.3 değerindedir. Hacimce su emme oranının ortalama değerleri incelendiğinde C0 grubunda %8.4, C3 grubunun %8 ve C6 grubunun %7.9 olduğu görülmektedir.



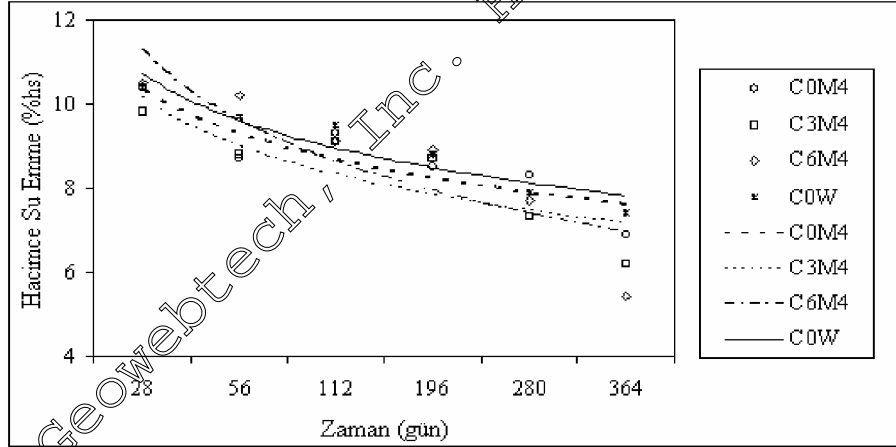
Şekil 4.3 Su ile çevrim uygulanan beton numunelerinde $\%h_s-t$ ilişkisi

Su ile ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılan numunelerde 12. tekrar sonunda hacimce su emme değeri C0 grubunda %28.8, C3 grubunda %36.7 ve C6 grubunda yaklaşık %50

oranında azalma olduğu görülmüştür. Farklı CI konsantrasyonundaki çözeltiler ile ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılan betonlarda 12. çevrim sonunda M1 serisinin C0 grubunda %38.5, C3 grubunda %35.7 ve C6 grubunda %48.6 oranında azalma, M4 serisinin C0 grubunda %33.7 C3 grubunda %36.7, C6 grubunda %48.6 oranında azalma gözlenmiştir.



Şekil 4.4 M1 çözeltisi ile çevrim uygulanan beton numunelerinde %h_s-t ilişkisi



Şekil 4.5 M4 çözeltisi ile çevrim uygulanan beton numunelerinde %h_s-t ilişkisi

Bu veriler değerlendirildiğinde, su etkisinde tüm gruplarda hidrasyonun sürdüğü, boşlukların azaldığı, yüksek konsantrasyonlu CI etkisinde bile betonlarda çatlak oluşmadığı, betona katılan cürufun olumlu etki yaptığı, boşluk oluşumunu engellediği anlaşılmaktadır. Cürufun boşluk yapısına olumlu etkisi zaman içinde belirgin olmakta, cüruf katkılı grupların daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Torii ve Kawamura (1992) tarafından yapılan deneysel çalışmada, betonda mineral katkı olarak kullanılan yüksek fırın cürufunun daha ince ve süresiz boşluk yapısı oluşturduğu ifade edilmektedir. Bagel (1998)'de, yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı gibi mineral katkıların, puzolanik reaksiyon sonucu küçük

ve süreksiz boşluk yapısı oluşturarak betonun difüzyonunun ve permeabilitesinin daha düşük olduğunu ifade etmektedir. Brylicki vd. (1992)'de cüruf miktarının artması ile hidrate kalsiyum alüminat ve portlandit miktarının azalmasına bağlı olarak, bu hidrate elemanların neden olduğu genleşmelerin azalmasına bağlı olarak mikro yapıda mikro çatlaklar oluşmadığını ifade etmektedirler. Betondaki boşluklar süreksiz ise, betonun porozitesi yüksek olsa bile geçirimsizliği düşük olmaktadır (Kearsley ve Wainwright, 2001).

4.1.3 Basınçlı Su İşleme Derinliği

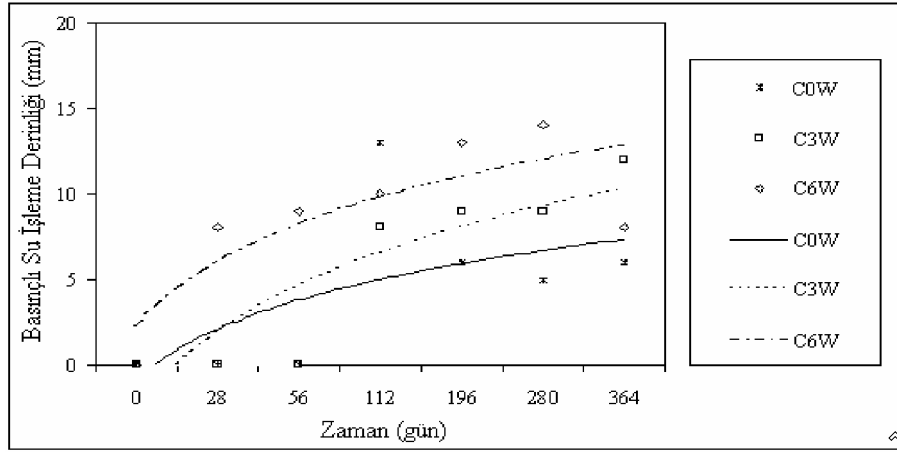
Beton özelliğine (C0, C3, C6) ve eskitme sürecine göre (W, M1, M4) basınçlı su işleme derinliği deneyinden belirlenen değerler, çevrim sayısı ve zamana bağlı olarak Çizelge Ek 1, 2 ve 3'te, basınçlı su işleme derinliğinin zamanla değişimi ile ilgili istatistiksel bağıntılar ve korelasyon katsayıları Çizelge Ek 11'de verilmiştir.

Basınçlı su işleme derinliğinin tüm gruplarda zamanla arttığı (Şekil 4.6-4.8), bu artışın C6 grubunda diğerlerinden daha fazla olduğu, C6 grubunu C3 grubu serilerinin izlediği ve C0 grubunun su işleme derinliğinin cüruf katkılı gruplara kıyasla daha az oranda arttığı görülmüştür. Başlangıçta (28. günde) C0 ve C3 grubu betonlara su işlemediği, C6 grubunda ise derinliğin 8 mm olduğu dikkat çekmektedir. Tüm deney sonuçlarına bakıldığında, su işleme derinliğinin en büyük değerinin sırası ile C0 grubunda 13 mm, C3 grubunda 14 mm ve C6 grubunda 15 mm olduğu görülmektedir.

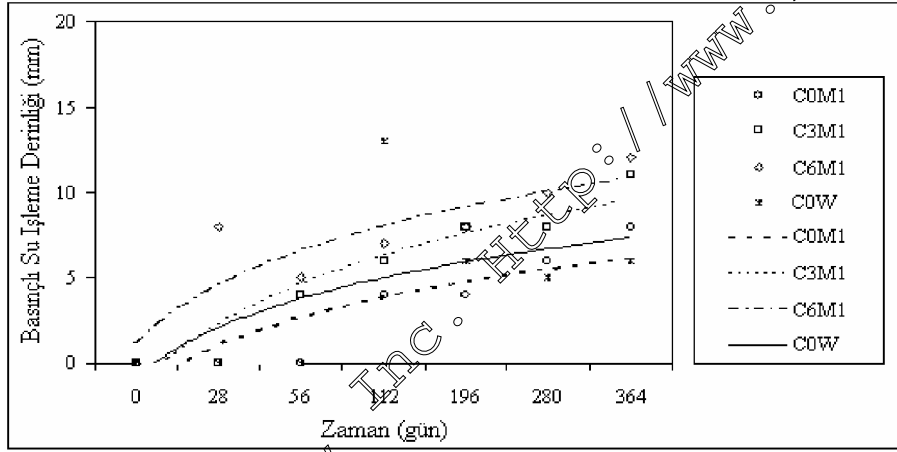
Basınçlı su işleme derinliği eskitme sürecine göre incelendiğinde 12 çevrim sonunda; suda ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan C0 grubunda 6 mm, C3 grubunda 12 mm, C6 grubunda ise 8 mm'dir. Her üç grup için M1 serileri incelendiğinde; C0 grubunda 8 mm, C3 grubunda 11 mm, C6 grubunda 12 mm, M4 serilerinde ise; C0 grubunda 12 mm, C3 grubunda 14 mm, C6 grubunda 15 mm olduğu görülmektedir.

Bu veriler değerlendirildiğinde, cüruf katkılı ve katkısız betonlarda, su işleme derinliğinin en büyük değerinin M4 serisinde, en düşük değer ise W serisinde olduğu görülmektedir.

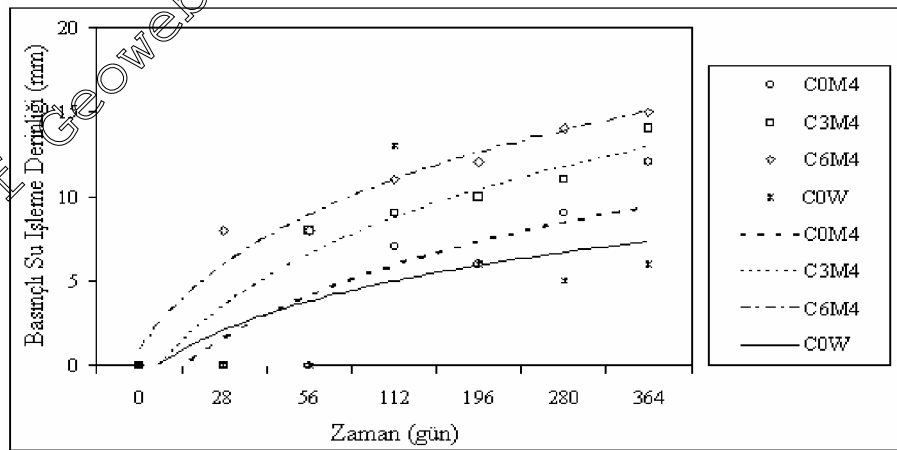
Özetle, su işleme derinliği, 15 mm ile C6 grubunun M4 etkisinde en yüksek, C0 grubunun W etkisinde 6 mm ile en düşüktür, eskitme sürecindeki çözeltilerin klorür konsantrasyonundaki artış ile su işleme derinliği de artmaktadır, ancak su işleme derinliğine ait hiçbir değer, TS 3440'ta (1982) kuvvetli kimyasal etkilere maruz betonlar için öngörülen en çok 30 mm, zayıf kimyasal etkilere maruz betonlar için öngörülen 50 mm değerini aşmamıştır.



Şekil 4.6 Su ile çevrim uygulanan beton numunelerinde h_w-t ilişkisi



Şekil 4.7 M1 çözeltilisi ile çevrim uygulanan beton numunelerinde h_w-t ilişkisi



Şekil 4.8 M4 çözeltilisi ile çevrim uygulanan beton numunelerinde h_w-t ilişkisi

4.2 Mekanik Özelliklerin Değerlendirilmesi

Beton numunelerde yapılan basınç ve yarma deneylerinden belirlenen basınç dayanımı, elastisite modülü ve yarma dayanımı ile ilgili değerlendirmeler ve bu özelliklerin zaman ile değişimi aşağıda açıklanmıştır.

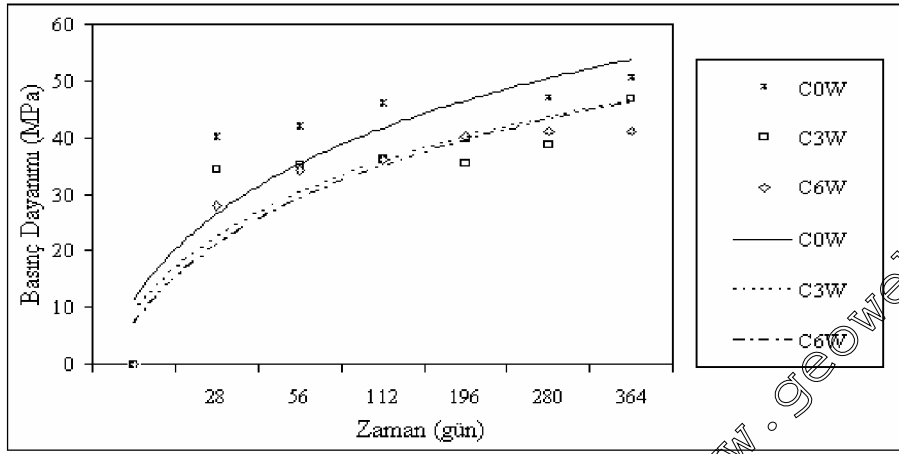
4.2.1 Basınç Dayanımı

Beton gruplarına (C0, C3, C6) ve eskitme sürecine göre (W, M1, M4) basınç dayanımı değerleri çevrim sayısı ve zamana bağlı olarak Çizelge Ek 1, 2 ve 3'te, basınç dayanımının zamanla değişimi (f_c-t) Şekil 4.9- 4.11'de, değişime ait istatistiksel bağıntılar ve bu bağıntılara ait korelasyon katsayıları Çizelge Ek 12'de verilmiştir. Çizelge ve şekiller incelendiğinde, basınç dayanımının cüruf katkılı ve katkısız tüm betonlarda 364. gün (12 çevrim) kadar arttığı görülmüştür. Bu durum, su emmede de ifade edildiği gibi, zaman içinde hidrasyonun sürdüğünün, boşlukların azaldığının bir göstergesidir.

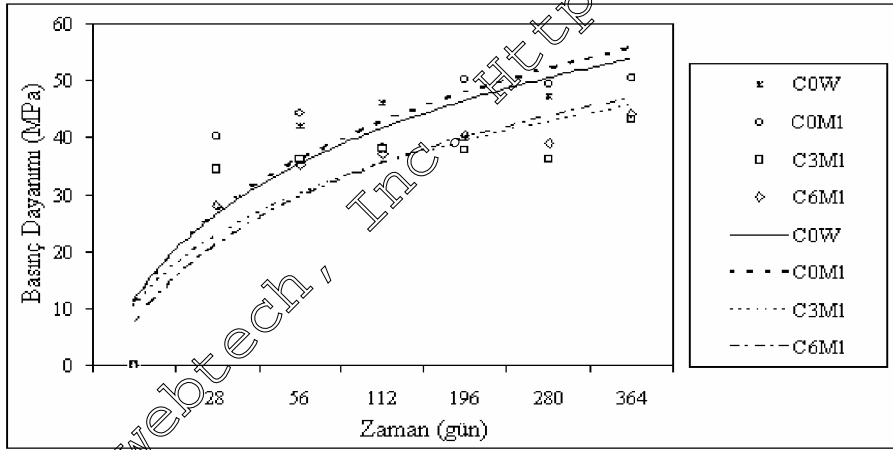
Kontrol serileri incelendiğinde; basınç dayanımı, başlangıçta (28. gün) C0 grubunda 40.1 MPa, C3 grubunda 34.4 MPa ve C6 grubunda 28.0 MPa değerindedir. Buna göre cüruf katkılı betonların başlangıçtaki basınç dayanımı cüruf katkısızına göre C3 grubunda %14.2, C6 grubunda %30.2 daha düşüktür, cüruf oranı arttıkça basınç dayanımı azalmaktadır. Suda ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılan numunelerin 12. tekrar sonundaki basınç dayanımı C0 grubunda yaklaşık %26.2, C3 grubunda %36.3 ve C6 grubunda %46.4 oranında artmıştır. Farklı Cl⁻ konsantrasyonunda çözeltiler ile ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılan betonlarda 12. çevrim sonunda M1 serisinin C0 grubunda yaklaşık %25.2, C3 grubunda %25.3 ve C6 grubunda %57.5 oranında artış, M4 serisinin C0 grubunda yaklaşık %19, C3 grubunda %26.5, C6 grubunda %37.5 oranında artış gözlenmiştir. Basınç dayanımı, eskitme sürecinden ve çözeltilerin Cl⁻ konsantrasyonundan bağımsız olarak ele alındığında, Çizelge Ek 1, 2 ve 3'te görüldüğü gibi C0 grubunda en büyük değer 50.6 MPa, en küçük 38.1 MPa, C3 grubunda en büyük 46.9 MPa, en küçük 34.4 MPa, C6 grubunda en büyük 44.1 MPa, en küçük 28.0 MPa değerindedir.

Bu veriler değerlendirildiğinde, Şekil 4.9-4.11'de görüldüğü gibi cüruf katkılı ve katkısız betonlarda su ve Cl⁻ etkisinde basınç dayanımının zamanla arttığı, hidrasyonun sürdüğü, boşlukların azaldığı, yüksek Cl⁻ konsantrasyonlarda bile hasar oluşmadığı, betona katılan cürufun betonun dayanıklılığına (dürabilitesine) olumlu etki yaptığı, hasar oluşumunu engellediği anlaşılmaktadır. Islanma-kuruma etkisine maruz bırakılan betonların basınç dayanımında azalma olmamış, tüm gruplarda 12. çevrim sonunda artış olmuştur. Bunlardan

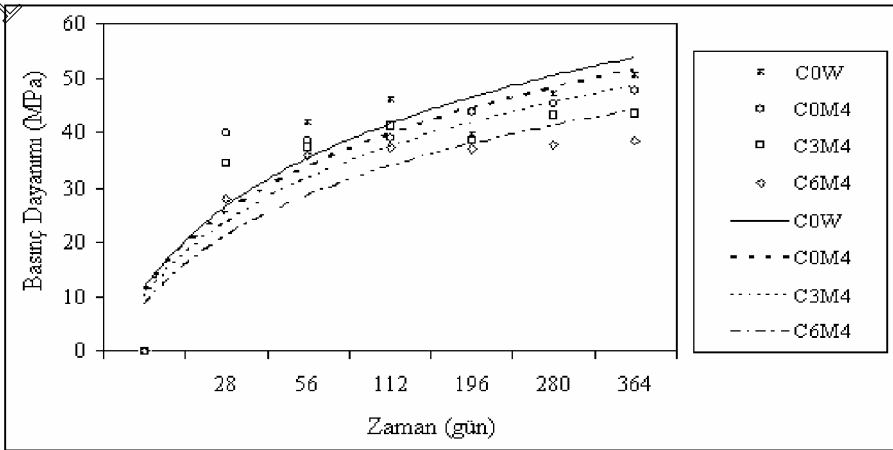
örneğin C6 grubunun basınç dayanımı, 12. çevrim sonunda W, M1 ve M4 serilerinde sırası ile %46.4, %57.5 ve %37.5 ile en yüksek artışı göstermiş, bunu C3 ve C0 grupları izlemiştir.



Şekil 4.9 Su ile çevrim uygulanan beton numunelerinde f_c -t ilişkisi



Şekil 4.10 M1 çözeltisi ile çevrim uygulanan beton numunelerinde f_c -t ilişkisi



Şekil 4.11 M4 çözeltisi ile çevrim uygulanan beton numunelerinde f_c -t ilişkisi

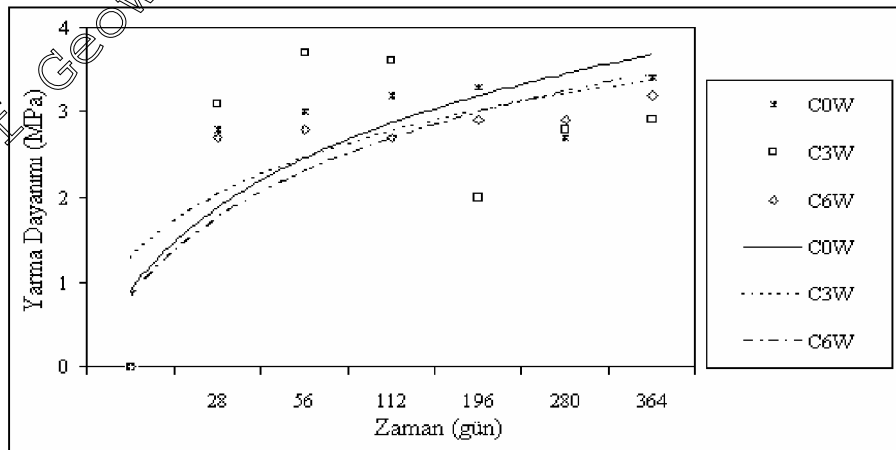
4.2.2 Yarma Dayanımı

Yarma dayanımı beton gruplarına (C0, C3, C6) ve eskitme sürecine göre (W, M1, M4) çevrim sayısı ve zamana bağlı olarak Çizelge Ek 1, 2 ve 3'te, yarma dayanımının zamanla değişimi (f_{cts-t}) Şekil 4.12-4.14'te, değişime ait istatistiksel bağıntılar ve korelasyon katsayıları Çizelge Ek 13'de verilmiştir. Çizelge ve şekiller incelendiğinde, yarma dayanımının cüruf katkılı ve katkısız tüm betonlarda 364 gün (12 çevrim) içinde basınç dayanımına benzer şekilde arttığı görülmektedir.

Kontrol serileri incelendiğinde, yarma dayanımının başlangıçtaki (28. gün) değeri, C0 grubunda 2.8 MPa, C3 grubunda 3.1 MPa ve C6 grubunda 2.7 MPa'dır. Buna göre %30 cüruf katkılı betonların yarma dayanımı, cüruf katkısızdan %10.7 ve %60 cüruf katkılı gruptan %14.8 oranında daha yüksektir.

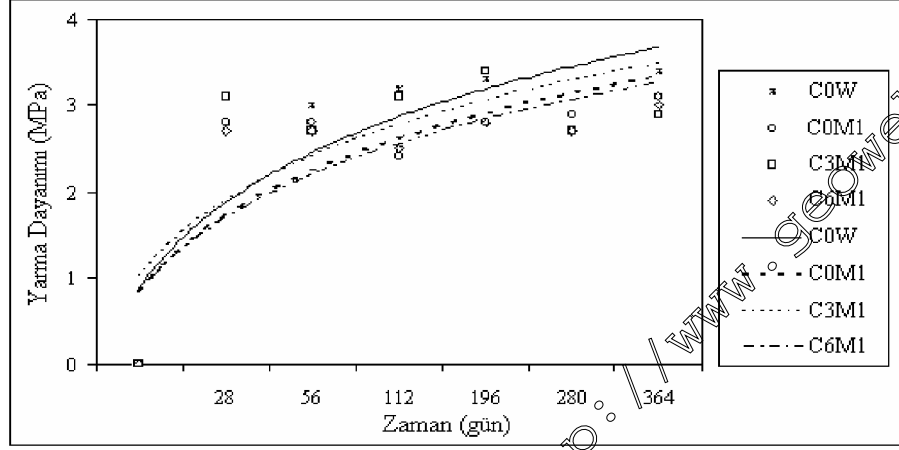
Yarma dayanımı değerleri eskitme sürecinden ve çözeltilerin Cl konsantrasyonundan bağımsız olarak ele alındığında; Çizelge Ek 1, 2 ve 3'te görüldüğü gibi, C0 grubunda en büyük 3.4 MPa, en küçük 1.8 MPa, C3 grubunda en büyük 3.7 MPa, en küçük 2.0 MPa ve C6 grubunda en büyük 3.3 MPa, en küçük 2.5 MPa'dır. Ortalama değerler incelendiğinde C0 grubununki 2.60 MPa, C3 grubununki 2.85 MPa ve C6 grubununki 2.90 MPa'dır. Betona cüruf katılması yarma dayanımını arttırmıştır.

Suda ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılan numunelerden C0 ve C6 grubunun yarma dayanımı, 12. tekrar sonunda başlangıca göre sırası ile %21.4 ve %18.5 oranında artmış, C3 grubunda ise %6.5 azalmıştır.

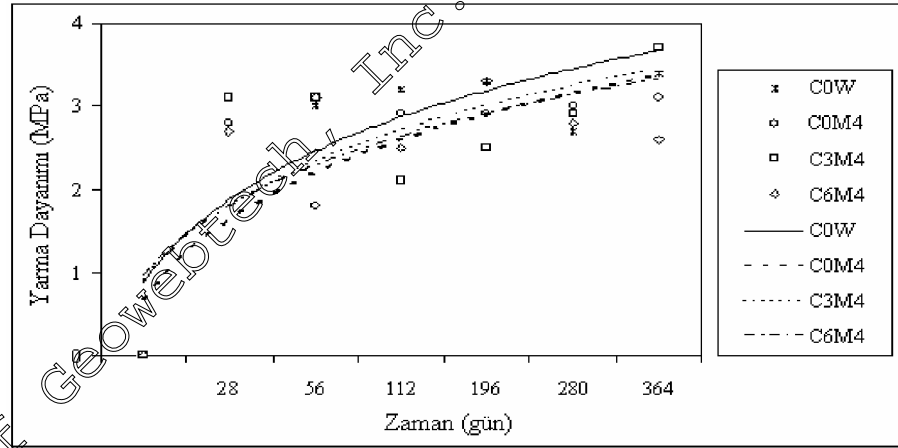


Şekil 4.12 Su ile çevrim uygulanan beton numunelerde f_{cts-t} ilişkisi

Farklı Cl konsantrasyonundaki çözeltiler ile ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılan betonlarda 12. çevrim sonunda M1 serisinin C0 ve C6 grubunda sırası ile %10.7 ve %11.1 oranında artış, C3 grubunda ise %6.5 oranında azalma olmuştur. M4 serisinin C0 ve C3 grubunda sırası ile %10.7 ve %19.4 oranında artış olurken C6 grubunda %3.7 oranında azalma meydana gelmiştir.



Şekil 4.13 M1 çözeltisi ile çevrim uygulanan beton numunelerinde f_{cts} -t ilişkisi



Şekil 4.14 M4 çözeltisi ile çevrim uygulanan beton numunelerinde f_{cts} -t ilişkisi

Bu veriler değerlendirildiğinde, gerek su gerekse $MgCl_2$ 'lü çözeltiler ile uygulanan ıslanma-kurumanın, yarma dayanımına önemli derecede olumsuz etkisi olmamış, bazı grupların yarma dayanımında zamanla artış gözlenmiştir. 12. çevrim sonunda %21.4 oranı ile en büyük artışın suda ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılan cüruf katkısız grupta meydana geldiği, bunu %19.4 artış ile C3 grubunun M4 serisinin, %18.5 ile C6 grubunun suda ıslanma-kuruma uygulanan serisinin izlediği görülmektedir.

Konu ile ilgili çalışmalarda ve standartlarda, 4.1 bağıntısında da görüldüğü gibi betonun çekme dayanımının basınç dayanımının karekökü ile doğru orantılı olduğu ortaya konulmuştur (TS 500, 2000; ACI 363R, 1992; Iravani, 1996).

$$f_{cts} = \alpha_f \sqrt{f_c} \quad (4.1)$$

Bağıntıda; α_f katsayı olmak üzere, f_{cts} ; betonun yarmada çekme dayanımı, f_c ; basınç dayanımını ifade etmektedir.

Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kurallarının verildiği TS 500'de (2000) ve ACI 363R'de (1992) betonun çekme dayanımının, 4.2 ve 4.3 bağıntılarında verildiği gibi basınç dayanımının kare kökü ile orantılı olduğu varsayılmakta, α_f katsayısının TS 500'de 0.53, ACI 363R'de 0.59 olarak alınmaktadır. Yerlici ve Ersoy (1995) tarafından betonun çekme ve basınç dayanımı arasındaki ilişkinin araştırıldığı çalışmada; beton dayanımı yükseldikçe bu değişimin, 4.4 bağıntısında verildiği gibi basınç dayanımının 0.62 inci kuvvetine bağlamanın gerçeğe daha yakın olacağı ifade edilmektedir. Beton dayanımının geniş sınırlar içinde değişmesi halinde 4.4 bağıntısında verilen ilişkinin TS500'de (2000) verilen 4.2 bağıntısından daha gerçekçi olduğu ifade edilmektedir.

$$f_{cts}=0.53 f_{ck}^{0.50} \quad (4.2)$$

$$f_{cts}=0.59 f_{ck}^{0.50} \quad (4.3)$$

$$f_{cts}=0.36 f_{ck}^{0.62} \quad (4.4)$$

Arioğlu (1996) ise TS 500'de verilen bağıntının korelasyon katsayısını eleştirerek, daha yüksek korelasyon katsayısına sahip 4.5 bağıntısını önermektedir.

$$f_{cts}=0.321 f_{ck}^{0.661} \quad (4.5)$$

TS 500 (2000) ve Yerlici-Ersoy (1995) tarafından önerilen bağıntılardan faydalanılarak elde edilen matematiksel modeller, grupların en büyük ve en küçük basınç dayanımları için kontrol edildiğinde, birbirinden önemli ölçüde fark etmediği görülmüştür. Bu durumda her iki bağıntıdan birisi kullanılarak basınç dayanımı değerlerinden yarma dayanımı değeri tahmin edilebilir. Ancak tüm gruplar içindeki en düşük (28 MPa) ve en yüksek (50.6 MPa) basınç dayanımları bakımından, en düşüğe TS 500'ün, en yüksekte ise Yerlici-Ersoy'un önerdiği bağıntının kullanılmasının daha uygun olduğu görülmüştür.

Yüzer ve Aköz (2005) tarafından klorür etkisindeki betonun basınç ve çekme dayanımı arasındaki ilişkinin araştırıldığı deneysel çalışmadan alınan sonuçlara göre; betona üretim

aşamasında herhangi bir nedenle klorür karışması veya klorür iyonlarının sertleşmiş betona dışarıdan difüzyonu durumunda, beton özelliklerinde önemli değişiklikler meydana geldiğinden, basınç dayanımı ile yarma deneyinden belirlenen çekme dayanımı arasında TS 500’de verilen bağıntının geçerliliğini yitirdiği ve bu nedenle klor etkisinde kalan beton ve/veya betonarme elemanlarda, kalitenin sadece basınç dayanımı ile denetlenmesinin yeterli olmadığı, çekme dayanımının da denetlenmesi gerektiği ifade edilmektedir.

4.2.3 Elastisite Modülü

Gevrek kompozit bir malzeme olan betonun gerilme-deformasyon eğrisi ($\sigma-\epsilon$) bir doğru içermediğinden iki tür elastisite modülü tanımlanmaktadır. Bunlardan biri sekant modülü denen statik elastisite modülü (E_s), diğeri dinamik elastisite modülü (E_d) dır. Betona uygulanan gerilme, basınç mukavemetinden çok küçük ise bu iki modül birbirine yakın değerdedir. Elastisite modülünün $\sigma-\epsilon$ ilişkisinden saptanması güç olduğundan pratikte statik elastisite modülü basınç mukavemetine, dinamik elastisite modülü ise ultrases dalgası ile oluşturulan dinamik etkiye bağlı olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmadaki deney sonuçlarından, statik ve dinamik elastisite modülleri hesaplanmış, yapılan işlemler aşağıda açıklanmış, elde edilen sonuçlar çizelge ve grafiklerle gösterilmiştir.

Statik Elastisite Modülü

Statik elastisite modülü, pratik olarak ülkelerin yürürlükte olan yönetmeliklerinde, beton basınç dayanımının bir fonksiyonu ile ifade edilmektedir. Örneğin, Amerikan (ACI), Avrupa (CEB) ve Türk (TSE) standart ve yönetmeliklerinde elastisite modülünün hesabında, zaman etkisinden bağımsız olan ve basınç dayanımını esas alan aşağıdaki bağıntılar (4.6-4.9) öngörülmüştür (ACI 318, 1999; ACI 363, 1992; CSA A23.3, 1994; TS 500, 2000; CEB-FIB, 1978).

$$E_{s1} = 4730 \sqrt{f_c} \quad (4.6)$$

$$E_{s2} = 6900 + 3300 \sqrt{f_c} \quad (4.7)$$

$$E_{s3} = 14000 + 3250 \sqrt{f_c} \quad (4.8)$$

$$E_{s4} = 9500 ((f_c + 8))^{1/3} \quad (4.9)$$

Bu çalışmadaki basınç dayanımı değerlerinden yararlanılarak ACI 318’de (1999) verilen 4.6 bağıntısından E_{s1} , ACI 363 (1992) ve CSA A23.3’de (1994) verilen 4.7 bağıntısından E_{s2} , TS 500’de (2000) verilen 4.8 bağıntısından E_{s3} ve CEB-FIB (1978)’de verilen 4.9

bağıntısından E_{s4} hesaplanmış, değerler Çizelge Ek 4, 5 ve 6' da verilmiştir. Bağıntılarda; statik elastisite modülü E_s , (MPa), silindir basınç dayanımı f_c , (MPa) ile gösterilmiştir.

Basınç dayanımı kullanılarak hesaplanan ve beton gruplarına (C0, C3, C6) ve eskitme sürecine göre (W, M1, M4) Çizelge Ek 4, 5 ve 6'da verilen statik elastisite modülü değerleri incelendiğinde, basınç dayanımındaki artışa paralel şekilde arttığı görülmektedir. Basınç dayanımı değerleri kullanılarak hesaplanan dört adet statik elastisite modülünden (E_{s1} , E_{s2} , E_{s3} , E_{s4}), aynı basınç dayanımı için en yüksek statik elastisite modülü, TS 500'de (2000) verilen ve 4.8 bağıntısından yararlanılarak hesaplanmış olan E_{s3} değeridir. Buna sırası ile CEB-FIB (1978)'de verilen 4.9 bağıntısından hesaplanan E_{s4} , ACI 318'de (1999) verilen 4.6 bağıntısından hesaplanan E_{s1} ve ACI 363 (1992) ve CSA A23.3'de (1994) verilen 4.7 bağıntısından hesaplanan E_{s2} değerleri izlemektedir. Aynı basınç dayanımı değeri için TS 500'de (2000) verilen 4.8 bağıntısından yararlanılarak hesaplanan statik elastisite modülü (E_{s3}) özellikle yüksek dayanımlı betonlarda en yüksek değerde iken ACI 363 (1992) ve CSA A23.3'de (1994) verilen 4.7 bağıntısından yararlanılarak hesaplanan statik elastisite modülü (E_{s2}) en düşük değerdedir. Bununla beraber E_{s3} ve CEB-FIB'de (1978) verilen 4.9 bağıntısından yararlanılarak hesaplanan statik elastisite modülü (E_{s4}), 40 MPa'm altındaki basınç dayanımının değerlerinde hemen hemen aynı statik elastisite modülüne sahiptir. ACI 318'de (1999) verilen 4.6 bağıntısından yararlanılarak hesaplanan statik elastisite modülü (E_{s1}), 30MPa'm altındaki basınç dayanımı değerinde E_{s2} ile yaklaşık aynı değerde statik elastisite modülüne sahip iken, dayanım artışı ile aradaki fark daha belirgin olmaktadır.

TS 500'de (2000) verilen ve 4.8 bağıntısından yararlanılarak hesaplanmış olan E_{s3} değerinin, basınç dayanımı çok düşük olan betonlarda gerçekçi sonuç vermeyeceği açıktır. Bu standartta verilen bağıntının orta ve yüksek dayanımlı betonlarda kullanılması daha uygun olacaktır.

Poisson Oranı

Poisson oranının (μ) belirlenmesi için yapılan deneylerde bu oranın genellikle 0.11-0.21 arasında değer aldığı, bu karakteristik üzerinde etkisi en fazla olan faktörün beton üretiminde kullanılan agrega türü olduğuna işaret edilmektedir. Agreganın çakıl tanelerinden oluşması halinde Poisson oranının değişim aralığı, 0.15-0.18 iken kırmataşlı betonlarda bu değer, 0.19-0.21 arasındadır (Postacıoğlu, 1987). Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları TS 500'de (2000), betonun Poisson oranının 0.20 olarak kabul edilebileceği belirtilmektedir.

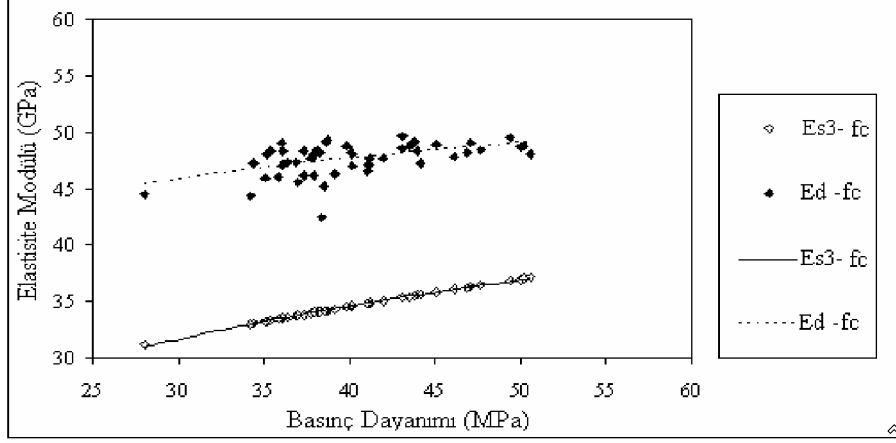
Dinamik Elastisite Modülü

Dinamik elastisite modülü (E_d), bu çalışmadaki deneysel verilerden ve ASTM C 597 (2002) ve BS 1881 Part 203'de (1986) verilen ultrases geçiş hızı, birim ağırlığı ve Poisson oranını esas alan 4.10'daki bağıntıdan yararlanılarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada, beton üretiminde kırmataş agregası kullanıldığı için E_d 'nin hesabında, Poisson oranı $\mu = 0.21$ kabul edilmiştir. Bağıntıda; dinamik elastisite modülü E_d , N/mm², Poisson oranı μ , yoğunluk Δ , kg/m³ ve ses geçiş hızı V , km/sn ile gösterilmiştir. Hesaplanan dinamik elastisite modülü değerleri Çizelge Ek 4, 5 ve 6' da verilmiştir.

$$E_d = \Delta V^2 \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu} \quad (4.10)$$

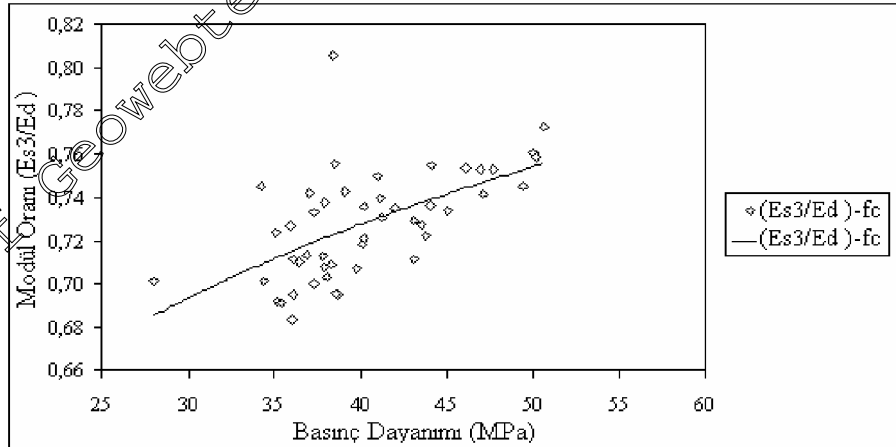
Kontrol serileri (28. gün) incelendiğinde; dinamik elastisite modülü başlangıçta C0 grubunda 48.1 GPa, C3 grubunda 47.2 GPa ve C6 grubunda 44.5 GPa değerindedir. Buna göre cüruf katkılı betonların başlangıçtaki dinamik elastisite modülü cüruf katkısız göre C3 grubunda yaklaşık %2, C6 grubunda %7.5 daha düşüktür, cüruf oranı arttıkça dinamik elastisite modülü azalmaktadır. Suda ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılan numunelerin 12. tekrar sonundaki dinamik elastisite modülü C0 grubunda aynı kalırken, C3 grubunda %2 ve C6 grubunda %4.5 oranında artmıştır. Farklı Cl konsantrasyonundaki çözeltiler ile ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılan betonlarda 12. çevrim sonunda M1 serisinin C0 grubunda yaklaşık %1.5, C3 grubunda %3 ve C6 grubunda %7 oranında artış, M4 serisinin C0 grubunda yaklaşık %0.6, C3 grubunda %3, C6 grubunda %1.6 oranında artış gözlenmiştir.

Dinamik elastisite modülü, eskitme sürecinden ve çözeltilerin Cl konsantrasyonundan bağımsız olarak ele alındığında, Çizelge Ek 4, 5 ve 6'da görüldüğü gibi C0 grubunda en büyük değer 49.4 GPa, en küçük 42.4 GPa, C3 grubunda en büyük 49.7 MPa, en küçük 47.2 GPa, C6 grubunda en büyük 48.1 GPa, en küçük 44.3 GPa değerindedir. Bu veriler değerlendirildiğinde, başlangıçta en büyük dinamik elastisite modülünün cüruf katkısız C0 grubunda olduğu ve cüruf ilavesi ile dinamik elastisite modülünün az da olsa azaldığı görülmektedir. 12. çevrim sonuçları değerlendirildiğinde ise dinamik elastisite modülündeki artışın %7 ile M1 serisinin C6 grubunda meydana geldiği görülmektedir. Farklı Cl konsantrasyonundaki çözeltiler ile ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılan betonlarda 12. çevrim sonundaki dinamik elastisite modülü değerlerindeki artışlar cüruf katkılı betonlarda cüruf katkısız göre daha yüksek olmaktadır. Bu da cürufun beton üretiminde kullanılması ile yüksek klorür konsantrasyonunda bile dayanıklılığını kaybetmediğinin bir göstergesidir.



Şekil 4.15 Elastisite modülü-basınç dayanımı ilişkisi

TS 500'de (2000) verilen 4.8 bağıntısından yararlanılarak hesaplanan statik elastisite modülü (E_{s3}) ve ASTM C 597 (2002) ve BS 1881 Part 203'da (1986) verilen 4.10'daki bağıntıdan yararlanılarak hesaplanan dinamik elastisite modülü (E_d) ile basınç dayanımı arasındaki ilişkinin araştırıldığı Şekil 4.15 ve Çizelge Ek 14'te görüldüğü üzere aynı basınç dayanımı değerleri için dinamik elastisite modülü, statik elastisite modülünden daha yüksek değerdedir. Modül oranının araştırıldığı Şekil 4.16 ve Çizelge Ek 15'te de görüldüğü gibi basınç dayanımı artışı ile oran artmış, basınç dayanımı 30 MPa'dan düşük olan betonlarda 0.68-0.70 mertebelerinde olan değerler, statik elastisite modülü basınç dayanımından hesaplandığı için basınç dayanımındaki artışla artmış, 0.76 mertebelerine ulaşmıştır.



Şekil 4.16 Modül oranı (E_{s3}/E_d)-basınç dayanımı ilişkisi

BS 1881: Part 203 (1986)'da verilen çizelgede, dinamik elastisite modülü statik elastisite modülünden daha yüksek değerlerdedir ve ayrıca ses geçiş hızındaki artış ile E_s/E_d oranı da artmaktadır. Örneğin, bu çalışmadaki betonlar için belirlenen ses geçiş hızlarının en düşük

4.5 km/sn, en yüksek 4.9 km/sn olduğu dikkate alınarak dinamik ve statik elastisite modüllerinin değerlerine bakıldığında; 4.6 km/sn ve 4.8 km/sn ses geçiş hızı için dinamik elastisite modülü sırası ile 42000 MPa ve 49000 MPa, statik elastisite modülü sırası ile 34000 MPa ve 43000 MPa'dır. Buna göre, Es/Ed oranı ise 0.81 ve 0.88 değerindedir. Deney sonuçlarından hesaplanan E_{s3} ve Ed değerlerinin yukarıda verilen değerlerin arasında kaldığı, modül oranının ise 0.70 ile 0.78 arasında değiştiği ve bir miktar düşük olduğu görülmektedir.

4.3 Korozyon Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Beton ve betonarmenin korozyonunun araştırılması amacı ile planlanan deneylerden alınan sonuçlar, karbonatlaşma derinliği, Cl⁻ difüzyonu, yarı-hücre potansiyeli, makro-hücre potansiyeli ve betonarme numunelerden çıkarılan donatılar için değerlendirilmiş ve aşağıda sırası ile verilmiştir.

4.3.1 Karbonatlaşma Derinliği

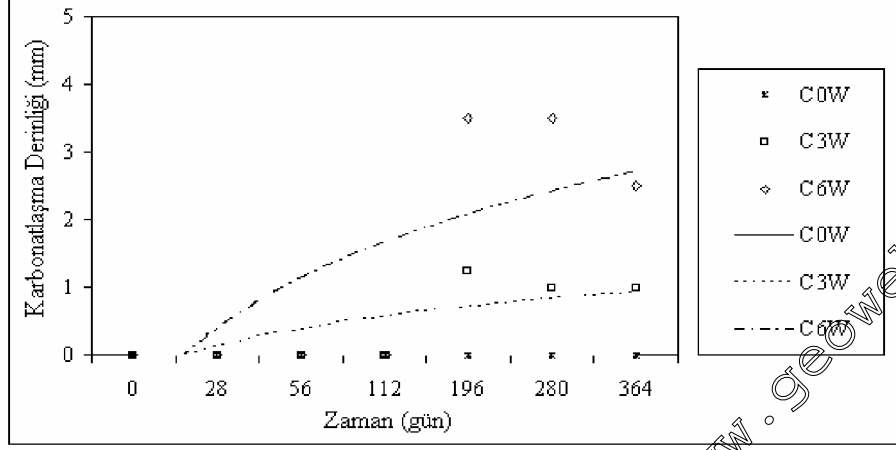
Karbonatlaşma derinliği, beton numunelerde başlangıçta, 1., 3., 6., 9., ve 12. ıslanma-kuruma çevrimlerinden sonra, betonarme numunelerde ise 15. çevrim sonunda araştırılmıştır. Beton numunelerde karbonatlaşma derinliğinin zamanla değişimi (d_c-t), Şekil 4.17-4.19'da verilmiş, bu iki değişken arasındaki ilişki istatistiksel olarak araştırılmış, Çizelge Ek 16 'da verilen bağıntılar elde edilmiştir. Karbonatlaşma derinliği, beton gruplarına (C0, C3, C6) ve eskitme sürecine göre (W, M1, M4), çevrim sayısı ve zamana bağlı olarak Çizelge Ek 1-3'te verilmiştir.

Betonarme numunelerde belirlenen karbonatlaşma derinliğinin ortalama değerleri Çizelge Ek 7'de, derinliğin YFC oranına göre değişimi Şekil 4.20'de, bu iki değişken arasındaki istatistiksel ilişkiler Çizelge Ek 17'de verilmiştir.

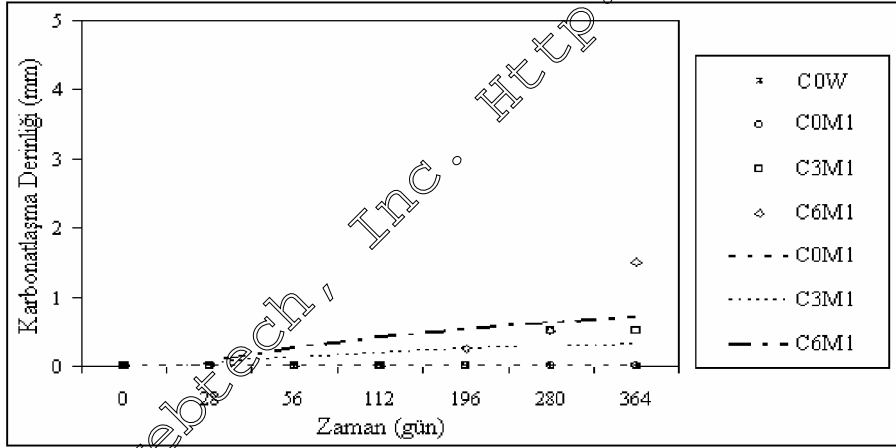
Çizelge 7'deki şekiller incelendiğinde, cüruf katkısız betonlarda 364 günlük (12 çevrim) sürede karbonatlaşma meydana gelmediği, cüruf katkılı gruplarda ise karbonatlaşmanın zamanla arttığı görülmektedir. Karbonatlaşma derinliğindeki artış, cüruf oranının artırılması ile artmıştır. Suda çevrim uygulanan numunelerdeki artış, klorürlü çözeltiler ile çevrim uygulanan numunelerden daha yüksektir ve klorürlü çözeltinin konsantrasyonu arttıkça karbonatlaşma derinliğinde azalma görülmektedir.

Karbonatlaşma derinliği, eskitme sürecinden ve çözeltilerin Cl⁻ konsantrasyonundan bağımsız olarak ele alındığında; C0 grubunda karbonatlaşma oluşmadığı, C3 grubunda en çok 1 mm ve C6 grubunda 3.5 mm olduğu görülmektedir (Çizelge Ek 1-3). Bu değerlendirmeye göre,

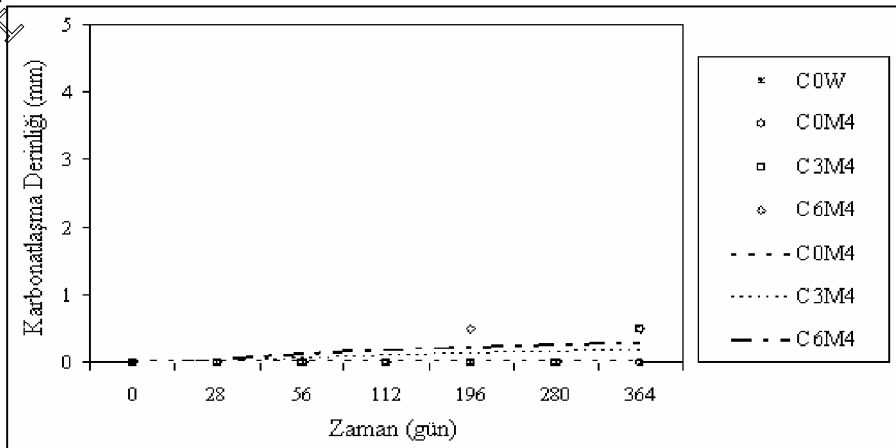
betona cüruf katılması puzolanik etkisi nedeni ile karbonatlaşma derinliğini arttırmıştır. Ortamda Cl^- iyonu bulunması, klorürlerin serbest kireç ile reaksiyona girmiş olması nedeni ile karbonatlaşmayı azaltan bir faktör olmuştur.



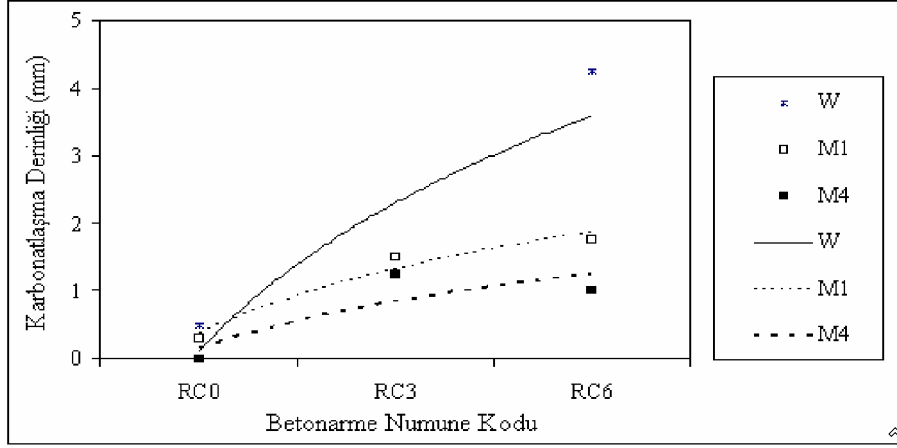
Şekil 4.17 Su ile çevrim uygulanan beton numunelerinde d_c - t ilişkisi



Şekil 4.18 M1 çözeltili ile çevrim uygulanan beton numunelerinde d_c - t ilişkisi



Şekil 4.19 M4 çözeltili ile çevrim uygulanan beton numunelerinde d_c - t ilişkisi



Şekil 4.20 Betonarme numunelerde d_c -YFC oranı ilişkisi

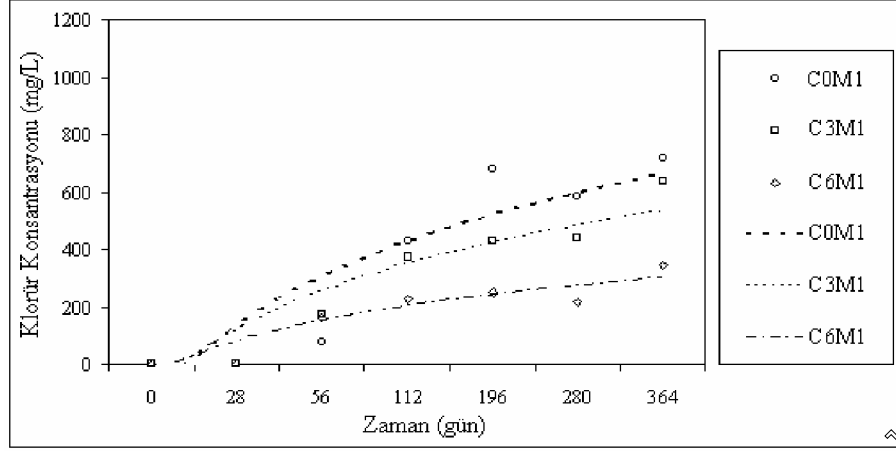
Betonarme numunelerde 15. çevrim sonunda belirlenen karbonatlaşma derinliğinin cüruf oranı ile arttığı, en büyük artışın suda çevrim uygulanan serilerde olduğu ve bunu M1 ve M4 serilerinin izlediği görülmektedir.

4.3.2 Cl Difüzyonu

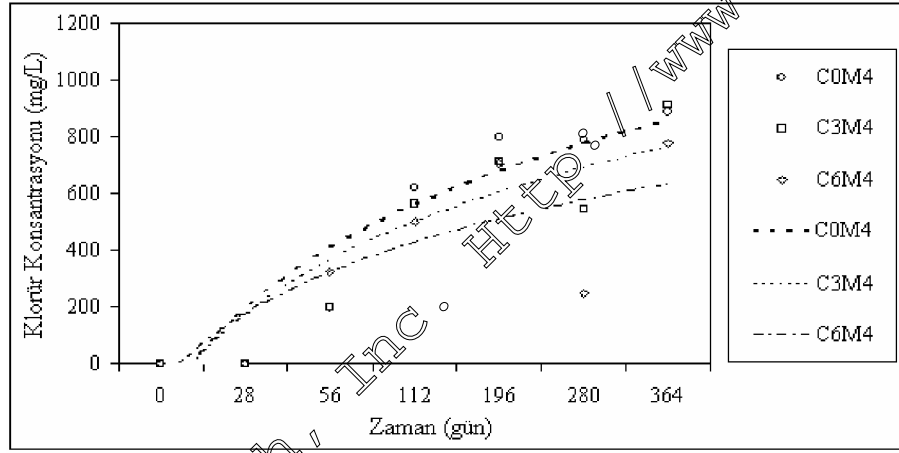
Klorür difüzyonu, beton numunelerde başlangıçta, 1., 3., 6., 9., ve 12. ıslanma-kuruma çevrimlerinden sonra zamana, betonarme numunelerde ise 15. çevrim sonunda derinliğe bağlı olarak araştırılmıştır.

Beton numunelerde klorür difüzyonunun zamanla değişimi ($Cl-t$) Şekil 4.21-4.22'de verilmiş, bu değişkenler arasında istatistiksel ilişki araştırılmış, korelasyon katsayısı 0.80 ile 0.90 arasında değişen Çizelge Ek 15'te verilen bağıntılar elde edilmiştir. Betonarme numunelerde ise 15. ıslanma-kuruma çevrimi sonunda, klorür difüzyonunun derinlikle değişimi incelenmiş, Şekil 4.25-4.26'da verilen bu değişkenler arasında istatistiksel ilişki araştırılmış, korelasyon katsayısı 0.98 ile 0.99 arasında değişen ve Çizelge Ek 19'da verilen bağıntılar elde edilmiştir.

Klorür konsantrasyonu değerleri beton gruplarına (C0, C3, C6), eskitme sürecine (W, M1, M4) ve 3 farklı derinliğe (0-10, 20-30, 45-50 mm) göre çevrim sayısı ve zamana bağlı olarak Çizelge Ek 1-3'te; betonarme gruplarına (RC0, RC3, RC6), eskitme sürecine (W, M1, M4) ve 3 farklı derinliğe (0-10, 10-20, 20-30 mm) göre çevrim sayısı ve zamana bağlı olarak Çizelge Ek 7 'de verilmiştir.



Şekil 4.21 M1 çözeltisi ile çevrim uygulanan beton numunelerinde Cl⁻ konsantrasyonu-t ilişkisi (0-10mm)

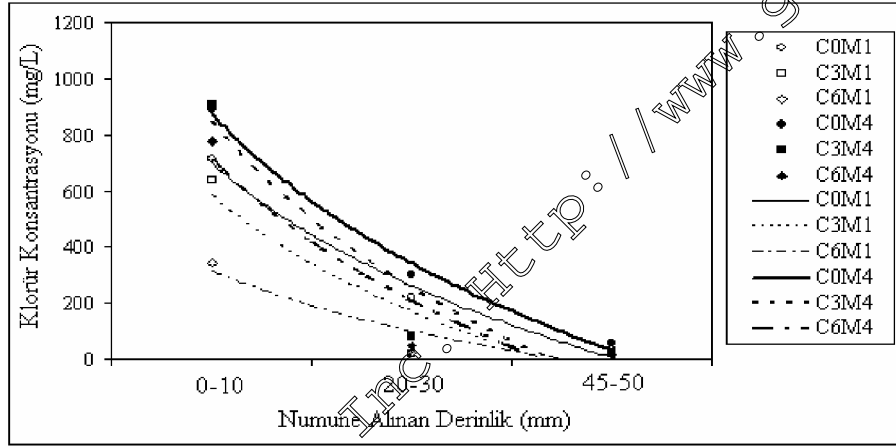


Şekil 4.22 M4 çözeltisi ile çevrim uygulanan beton numunelerinde Cl⁻ konsantrasyonu-t ilişkisi (0-10mm)

Buna göre beton numunelerinin M1 ve M4 serilerinde klorür konsantrasyonunun 0-10 mm bölgesinde zamanla arttığı, klorür konsantrasyonundaki artışın cüruf katkısız gruplarda, cüruf katkılı gruplardan daha büyük olduğu ve betona cüruf ilave edilmesi ile serbest klorür iyonu konsantrasyonunun azaldığı görülmektedir.

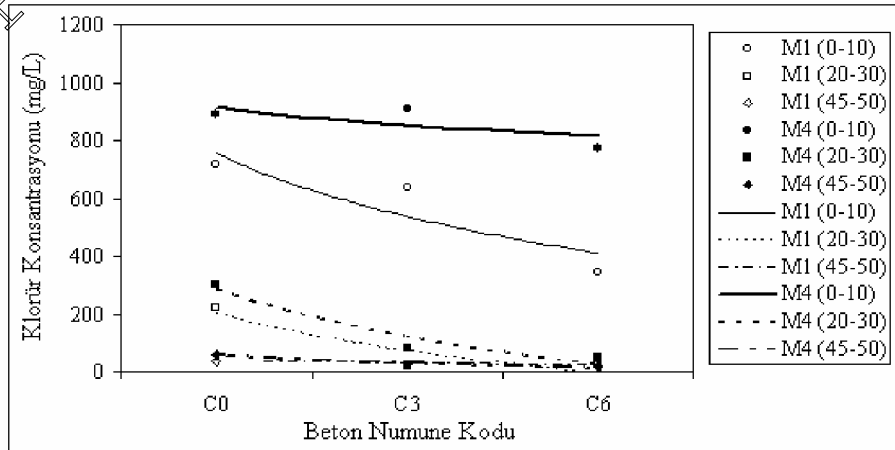
Farklı Cl⁻ konsantrasyonundaki çözeltiler ile ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılan betonların 12. çevrim sonunda 0-10 mm bölgesinde klorür konsantrasyonu M1 serisinin C0 grubunda 714 mg/L, C3 grubunda 637 mg/L, C6 grubunda 344 mg/L'dir. M4 serisinin ise C0 grubunda 888 mg/L, C3 grubunda 909 mg/L, C6 grubunda ise 774 mg/L'dir. M1 serisinde, betona cüruf katılması ve oranının artırılması, 0-10 mm bölgesinde klorür konsantrasyonunu azaltırken, M4 serisinde cüruf katkısız gruba göre C3 grubunda artış, C6 grubunda azalma meydana gelmiştir. M4 serisinin yüzey bölgesinde cüruf katılmasının klorür konsantrasyonunu azaltma etkisi M1 serisi kadar belirgin değildir.

20-30 mm bölgesindeki klorür konsantrasyonu değerleri incelendiğinde, betona cüruf ilave edilmesi ve oranının artırılması ile klorür konsantrasyonunun azaldığı görülmektedir. Cüruf kullanımının klorür konsantrasyonunu azaltma eğilimi 20-30 mm bölgesinde daha belirgin olmaktadır. M1 serisinin C0 grubunda 219 mg/L olan klorür konsantrasyonu C3 grubunda 18 mg/L, C6 grubunda ise 24 mg/L'dir. M4 serisinin C0 grubunda 301 mg/L olan klorür konsantrasyonu C3 grubunda 80 mg/L ve C6 grubunda 47 mg/L'dir. Benzer durum 45-50 mm bölgesi için de geçerlidir. Bu bölgede M1 serisinin C0 grubunda 34 mg/L olan klorür konsantrasyonu C3 grubunda 23 mg/L, C6 grubunda ise 19 mg/L'dir. M4 serisinin C0 grubunda 58 mg/L olan klorür konsantrasyonu C3 grubunda 23 mg/L ve C6 grubunda 14 mg/L'dir.



Şekil 4.23 Beton numunelerde 364 gün sonunda Cl^- konsantrasyonunun derinlik ile değişimi

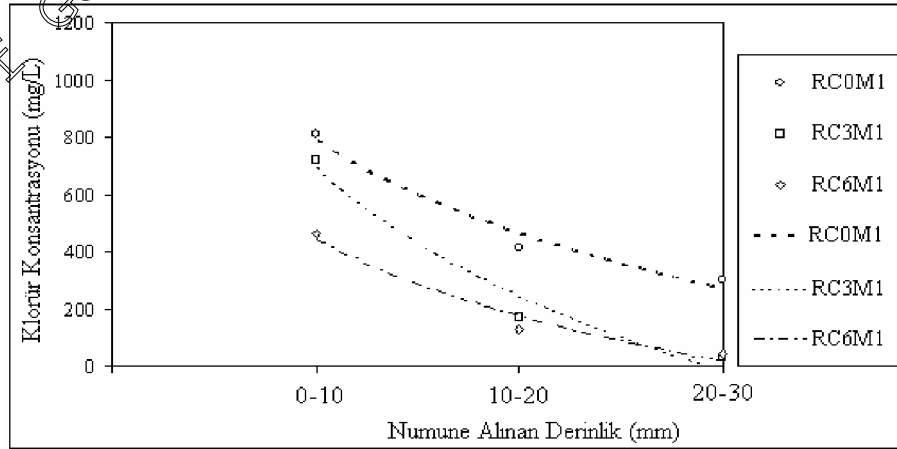
Beton numunelerde 364 gün sonunda Cl^- konsantrasyonunun derinlik ile değişiminin incelendiği Şekil 4.23 ve Çizelge Ek 20'de görüldüğü gibi, klorürlü çözeltiler ile ıslanma-kuruma uygulananların Cl^- konsantrasyonunu, numune alınan derinlik arttıkça azalmaktadır.



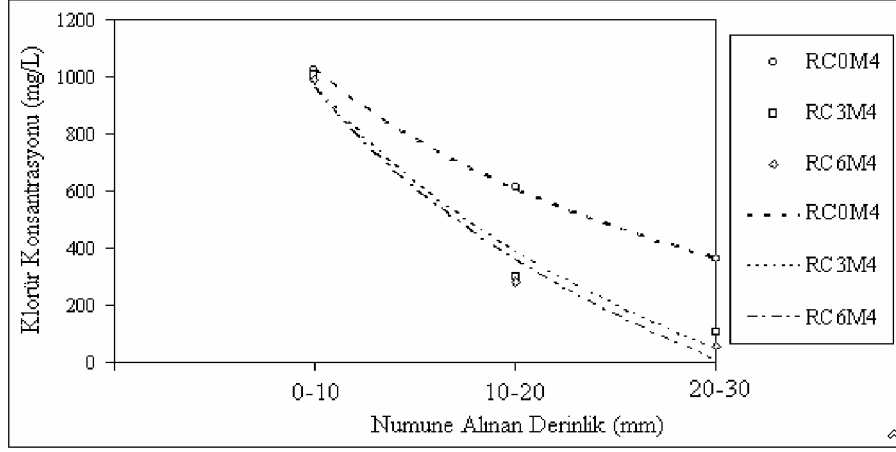
Şekil 4.24 Beton numunelerde 364 gün sonunda farklı derinlikteki Cl^- konsantrasyonunun YFC oranı ile değişimi

Cüruf katkısız beton numunelerden M1 çözültisi ile ıslanma-kuruma çevrimi uygulananlarda 0-10 mm derinlikte 714 mg/L olan klorür konsantrasyonu, %30 oranında cüruf katılması ile 637 mg/L'ye, %60 oranında cüruf katılması ile 344 mg/L'ye düşmektedir. Aynı derinlik için M4 çözültisi ile ıslanma-kuruma çevrimi uygulananlarda 888 mg/L olan klorür konsantrasyonu, %30 oranında cüruf katılması ile 909mg/L'ye artarken %60 oranında cüruf katılması ile 774 mg/L'ye düşmektedir. 20-30 mm derinlikte M1 çözültisi ile ıslanma-kuruma uygulananlardan cüruf katkısızlarda 219 mg/L olan klorür konsantrasyonu, %30 cüruf katılması ile ciddi şekilde düşerek 18 mg/L'ye, %60 cüruf katılması ile 24 mg/L değerine düşmektedir. Cürufun klorür konsantrasyonunu azaltıcı etkisi beton yüzeyinden derinlere inildikçe daha da artmaktadır. Aynı derinlikte M4 çözültisi ile ıslanma-kuruma uygulananlardan cüruf katkısızlarda 301 mg/L olan klorür konsantrasyonu, %30 cüruf katılması ile azalarak 80 mg/L'ye, %60 cüruf katılması ile 47 mg/L değerine düşmektedir. 45-50 mm derinlikte ise M1 çözültisi ile ıslanma-kuruma uygulananlardan cüruf katkısızlarda 34 mg/L olan klorür konsantrasyonu, %30 cüruf katılması ile azalarak 23 mg/L'ye, %60 cüruf katılması ile 19 mg/L değerine düşmektedir. Aynı derinlikte M4 çözültisi ile ıslanma-kuruma uygulananlardan cüruf katkısızlarda 58 mg/L olan klorür konsantrasyonu, %30 cüruf katılması ile azalarak 23 mg/L'ye, %60 cüruf katılması ile 14 mg/L değerine düşmektedir. Bu sonuçlara göre toz numune alınan derinlik arttıkça klorür konsantrasyonu düşmektedir (Şekil 4.23-4.24). Aynı zamanda özellikle yüzey bölgesinden derinlere inildikçe cürufun etkinliği artmakta ve klorür konsantrasyonunu düşürmektedir.

Bu değerlendirmeye göre, yüksek Cl^- konsantrasyonuna maruz betonların üretiminde yüksek oranda cüruf kullanılması Cl^- difüzyonunu azalttığı açıkça görülmektedir.



Şekil 4.25 M1 çözültisi ile 15 çevrim uygulanan betonarme numunelerde Cl^- konsantrasyonu-derinlik ilişkisi



Şekil 4.26 M4 çözeltisi ile 15 çevrim uygulanan betonarme numunelerde Cl⁻ konsantrasyonu-derinlik ilişkisi

Betonarme numunelerde de, cüruf katkılı (RC3, RC6) ve katkısız (RC0) grupların klorür konsantrasyonları, numune alınan derinlik arttıkça azalmaktadır. 15. çevrim sonunda M1 serisinde en yüksek klorür konsantrasyon değeri cüruf katkısız RC0 grubunun 0-10 mm bölgesinde iken aynı bölgede bunu cüruf katkılı RC3 ve RC6 grupları izlemektedir. M4 serisinde ise 0-10 mm bölgesinde tüm grupların klorür konsantrasyonu yaklaşık aynı değerde iken, numune alınan derinlik arttıkça farklılık görülmekte, 0-10 mm yüzey bölgesi hariç diğer bölgelerde cüruf katkılı grupların klorür konsantrasyonları cüruf ilave edilmesi ile ciddi bir şekilde düşmektedir (Şekil 4.25-4.26).

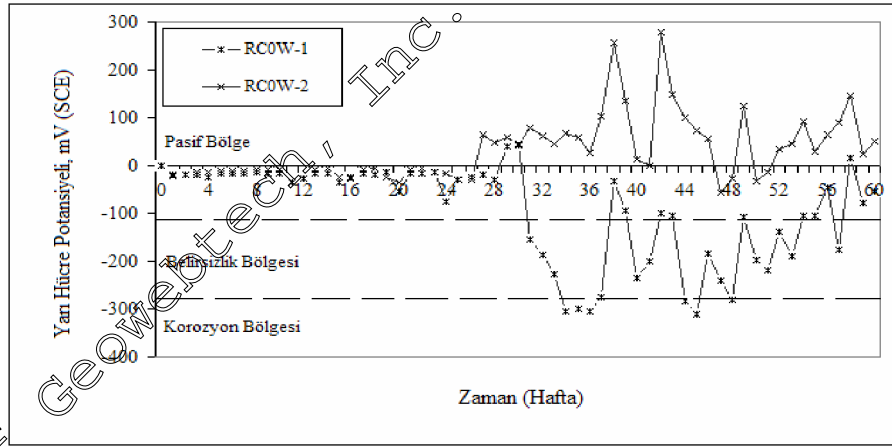
Farklı Cl⁻ konsantrasyonundaki çözeltiler ile ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılan betonarme numunelerde RC0, RC3 ve RC6 grubunda 0-10 mm bölgesindeki klorür konsantrasyonu değeri 15. çevrim sonunda, M1 serisinin RC0 grubunda 809 mg/L, RC3 grubunda 718 mg/L, RC6 grubunda 462 mg/L'dir. M4 serisinin RC0 grubunda ise 1024 mg/L iken, RC3 grubunda 1007 mg/L, RC6 grubunda 989 mg/L'dir. Deney sonuçlarından görüldüğü gibi, betona cüruf katılması ve oranının artırılması, 0-10 mm bölgesinde klorür difüzyonunu azaltmıştır.

Betonarme numunelerin iç kısımlarına ilerledikçe 10-20 mm bölgesindeki klorür konsantrasyonu değerleri incelendiğinde, M1 ve M4 serilerinde cüruf ilave edilmesi ve oranının artırılması ile klorür konsantrasyonunun azaldığı görülmektedir. M1 serisinin RC0 grubunda 414 mg/L olan klorür konsantrasyonu RC3 grubunda 169 mg/L, RC6 grubunda ise 126 mg/L'dir. M4 serisinin RC0 grubunda 614 mg/L olan klorür konsantrasyonu RC3 grubunda 299 mg/L ve RC6 grubunda 281 mg/L'dir. Aynı beton ile üretilen beton ve betonarme numunelerin aynı derinlikten alınan toz numunelerde tayin edilen Cl⁻ iyonunun farklı olması, ıslanma kurumanın, beton numunelerin çözeltiliye tam batırılarak, betonarme

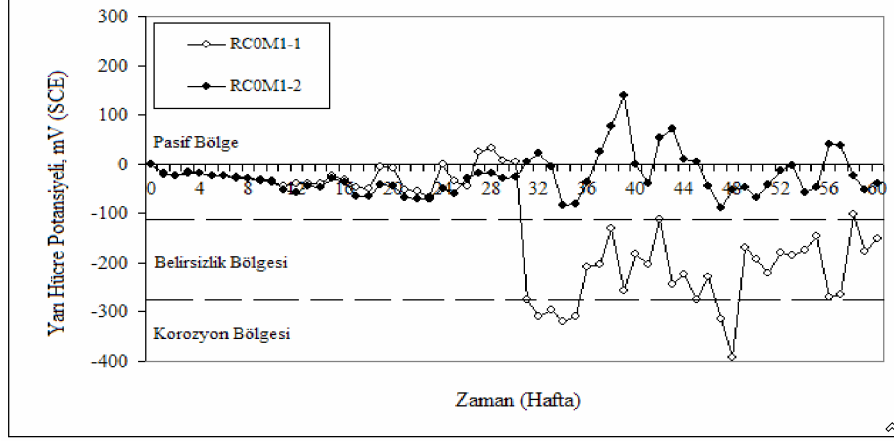
numunelerin ise yüzeyine yerleştirilen havuzcuklardaki 30 mm yüksekliğindeki çözelti ile uygulanmasından bir başka deyişle sıvının basıncından kaynaklanmaktadır. Bu durum, yüzeyinden su veya çözeltiliye maruz kalan eleman ile su veya çözelti içinde kalan elemanın etkilenmesinin farklı olduğunu, sıvı basıncının etkili olduğunu göstermektedir. Betonarme numunelerin 45-50 mm bölgesinde, M1 serisinin RC0 grubunda 301 mg/L olan klorür konsantrasyonu RC3 grubunda 27 mg/L, RC6 grubunda 43 mg/L'dir. M4 serisinin RC0 grubunda ise 361 mg/L olan klorür konsantrasyonu RC3 grubunda 104 mg/L ve RC6 grubunda 60 mg/L'dir.

4.3.3 Yarı Hücre Potansiyeli

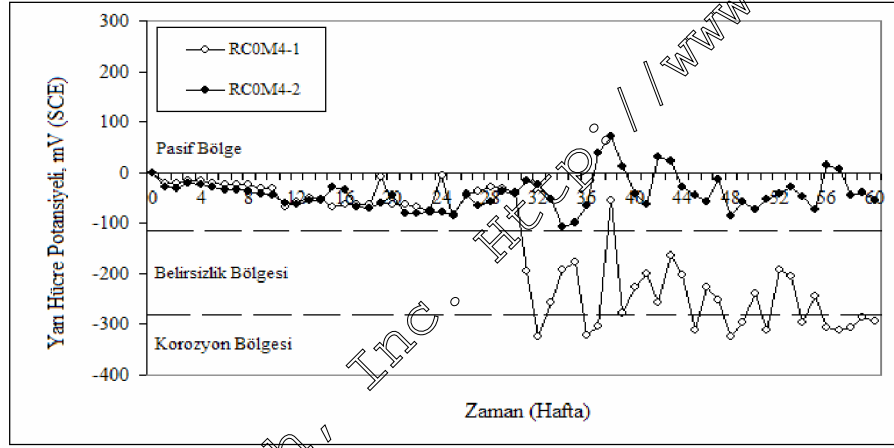
Hasarsız ve hasarlı betonarme numunelerde, kalomel referans elektrodu (SCE) kullanılarak birer hafta ara ile ölçülen yarı-hücre potansiyeli değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi cüruf oranına (RC0, RC3, RC6) ve eskitme sürecine (W, M1, M4) göre Şekil 4.27-4.35'te verilmiştir. Yarı-hücre potansiyel değerleri, ASTM C876'de (1991) kalomel elektroda göre verilen -270 mV ve -120 mV sınır değerleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.27 Su ile çevrim uygulanan YFC katkısız betonarme numunelerde yarı hücre potansiyeli-zaman ilişkisi

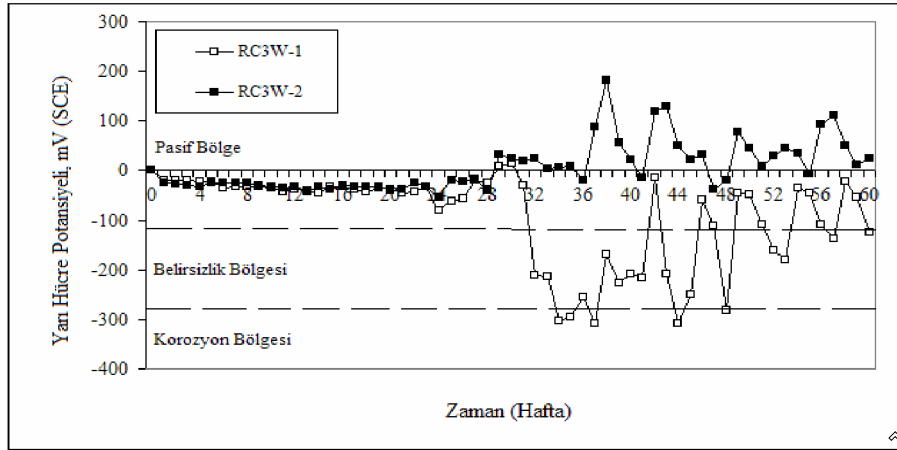


Şekil 4.28 M1 çözeltisi ile çevrim uygulanan YFC katkısız betonarme numunelerinde yarı hücre potansiyeli-zaman ilişkisi

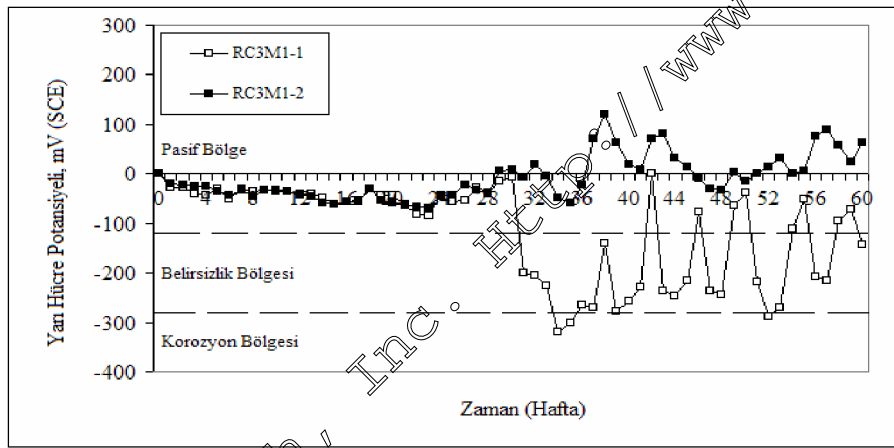


Şekil 4.29 M4 çözeltisi ile çevrim uygulanan YFC katkısız betonarme numunelerinde yarı hücre potansiyeli-zaman ilişkisi

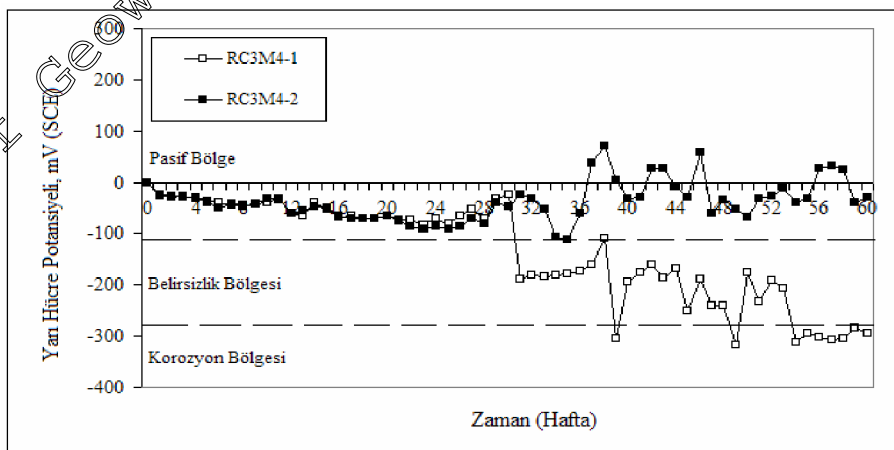
Yarı-hücre potansiyeli değerleri; W, M1 ve M4 çözeltileri ile ıslanma-kuruma uygulanan cüruf katkısız betonarme numunelerden (RC0) hasarsız olanlarda, Şekil 4.27-4.29'da görüldüğü gibi, 60 hafta boyunca pasif bölgede kalmıştır. Ancak hasar oluşturulanların yarı-hücre potansiyeli, 30. haftadan itibaren ani bir sıçrama ile korozyon bölgesine geçmiştir. Bunu izleyen süreçte yarı-hücre potansiyel değerleri, betonun ıslanma ve kurumasına bağlı olarak salınım göstermiştir. Su etkisinde zaman zaman korozyon bölgesine geçmiş olsa da, belirsizlik bölgesi ve pasif bölge arasında değerler alan yarı-hücre potansiyeli, çözeltilerin klorür iyon konsantrasyonundaki artışa (M1, M4) paralel olarak daha çok belirsizlik bölgesinde ve korozyon bölgesinde daha fazla salınım yapmıştır. Bu verilerden; hasarlı numunelerde klorürlü çözeltilerin konsantrasyonu arttıkça belirgin olarak korozyon oluştuğu söylenebilir.



Şekil 4.30 Su ile çevrim uygulanan %30 YFC katkıli betonarme numunelerinde yarı hücre potansiyeli-zaman ilişkisi

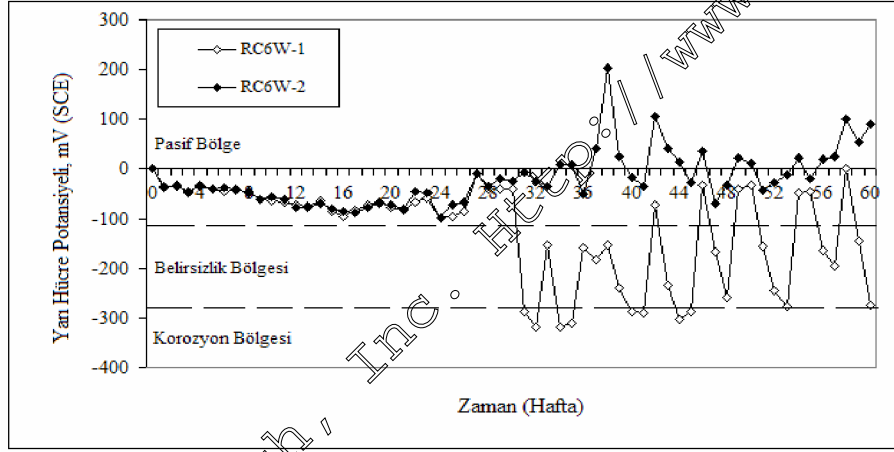


Şekil 4.31 M1 çözeltisi ile çevrim uygulanan %30 YFC katkıli betonarme numunelerinde yarı hücre potansiyeli-zaman ilişkisi

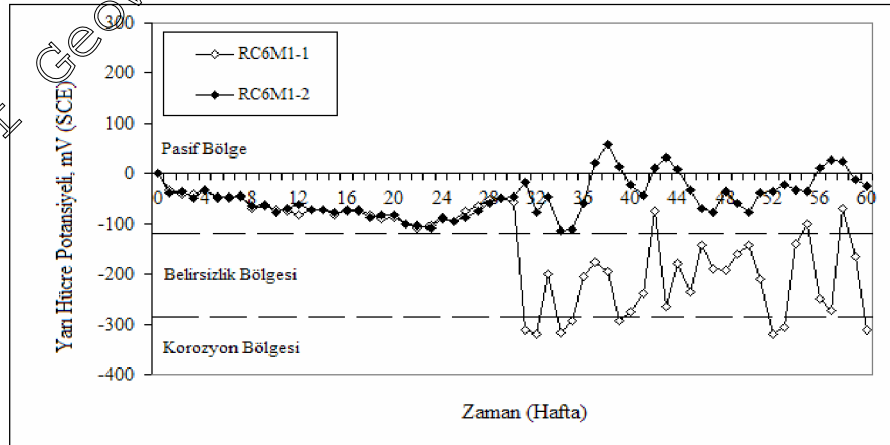


Şekil 4.32 M4 çözeltisi ile çevrim uygulanan %30 YFC katkıli betonarme numunelerinde yarı hücre potansiyeli-zaman ilişkisi

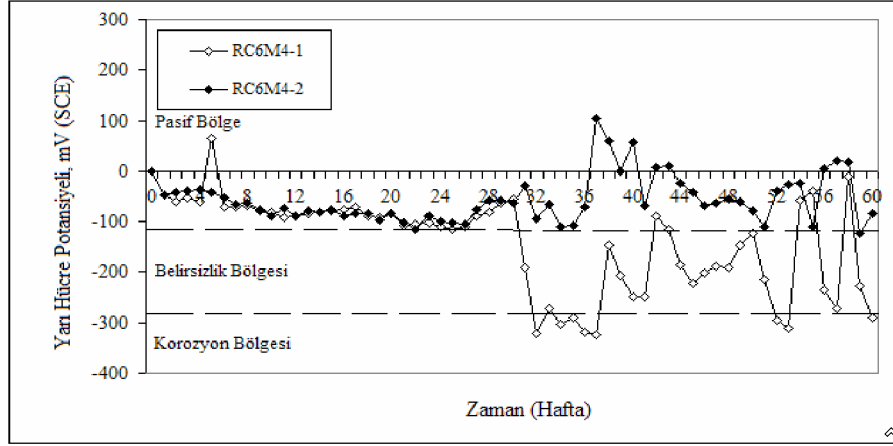
Beton üretiminde %30 oranında cüruf katılan (RC3) ve W, M1 ve M4 çözeltileri ile ıslanma-kuruma uygulanan betonarme numunelerden hasarsız olanların yarı-hücre potansiyeli Şekil 4.30-4.32’de görüldüğü gibi, 60 haftalık süre boyunca pasif bölgede kalmış, hasar oluşturulanların yarı-hücre potansiyeli 30. haftadan itibaren ani bir şekilde korozyon bölgesine geçmiştir. Yarı-hücre potansiyel değerleri bunu izleyen zaman içinde betonun ıslanma-kuruma sürecine bağlı olarak salınım yapmıştır. Su ve M1 etkisindeki numunelerde ise çoklukla belirsizlik bölgesinde ve pasif bölge arasında değerler alan yarı-hücre potansiyeli, en yüksek klorür iyonu içeren çözeltinin etkisinde ise belirsizlik bölgesi ve korozyon bölgesinde daha fazla salınım yapmış, pasif bölgede hiçbir değer alamamış, özellikle son haftalarda -270 mV değerinin de altına düşmüş ve korozyon bölgesine geçmiştir. Bu durum, çözeltideki klorür konsantrasyonunun korozyon artışıdaki etkisini açıkça göstermektedir.



Şekil 4.33 Su ile çevrim uygulanan %60 YFC katkılı betonarme numunelerde yarı hücre potansiyeli-zaman ilişkisi



Şekil 4.34 M1 çözeltisi ile çevrim uygulanan %60 YFC katkılı betonarme numunelerde yarı hücre potansiyeli-zaman ilişkisi



Şekil 4.35 M4 çözültisi ile çevrim uygulanan %60 YFC katkılı betonarme numunelerde yarı hücre potansiyeli-zaman ilişkisi

Beton üretiminde %60 oranında cüruf kullanılan (RC6) ve W, M1 ve M4 çözülteleri ile ıslanma-kuruma uygulanan betonarme numunelerden hasarsız olanların yarı-hücre potansiyeli, Şekil 4-33-4.35'de görüldüğü gibi, cüruf katkısız ve %30 cüruf katkılı numunelerinkine benzer şekilde 60 haftalık süre boyunca pasif bölgede kalmıştır. 30. haftada hasar oluşturulanların yarı-hücre potansiyeli, aynı bir şekilde korozyon bölgesine geçmiştir. Bunu izleyen süreçte betonun ıslanma ve kurumasına bağlı olarak yarı-hücre potansiyel değerleri salınımlar yapmıştır. Yarı-hücre potansiyeli W, M1 ve M4 etkisinde, çoklukla belirsizlik bölgesi ve pasif bölge arasında değerler almıştır.

Bu verilere göre, cüruf katkılı ve katkısız betonarme numunelerde ölçülen yarı-hücre potansiyeli değerleri 30. haftaya kadar standartta belirtilen pasif bölge için verilen -120 mV değerinin üstünde kalmıştır.

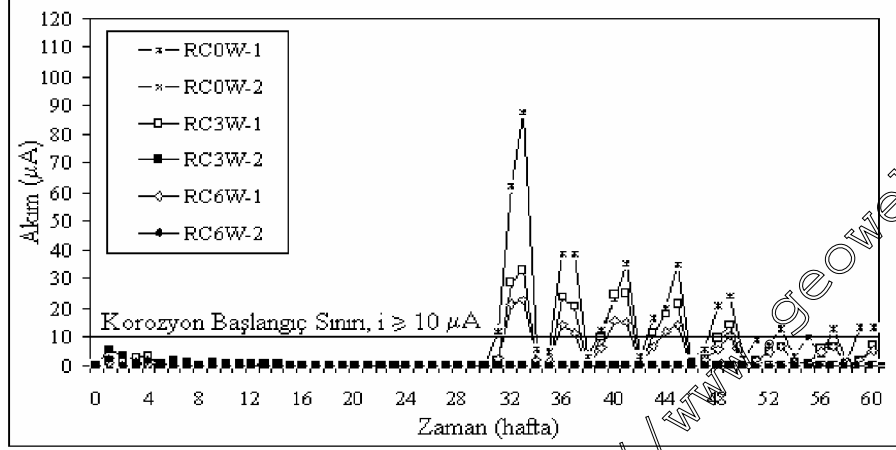
Hasar oluşturulmayan numuneler ise 60 hafta boyunca pasif bölgede kalmış, yarı-hücre potansiyeli değerlerine göre hasarsız numunelerde korozyon oluşmadığı görülmüştür. Buradan, betonarme elemanlarda, özellikle darbe etkisine maruz kalan yapılarda oluşacak hasarın, sistemde hızla korozyona neden olduğu ve hasarın önemi açıkça görülmektedir.

4.3.4 Makro Hücre Potansiyeli

Betonarme numunelerde anot ile katot arasına yerleştirilen 100 Ω ' luk sabit dirençte oluşan elektro-potansiyel fark (E, mV) birer hafta ara ile ölçülmüş, sistemdeki 100 Ω ' luk sabit dirençten geçen akım (μ A), 4.11 bağıntısından belirlenmiş, akım değerleri, ASTM G109-92'de korozyon başlangıcı için verilen 10 μ A'lık değer ile karşılaştırılmıştır. Akımın zamanla

değişimi Şekil 4.36-4.38’de verilmiştir. Bağlantıda i (amper), akımı; E (volt), elektropotansiyel farkı, R (ohm), direnci ifade etmektedir.

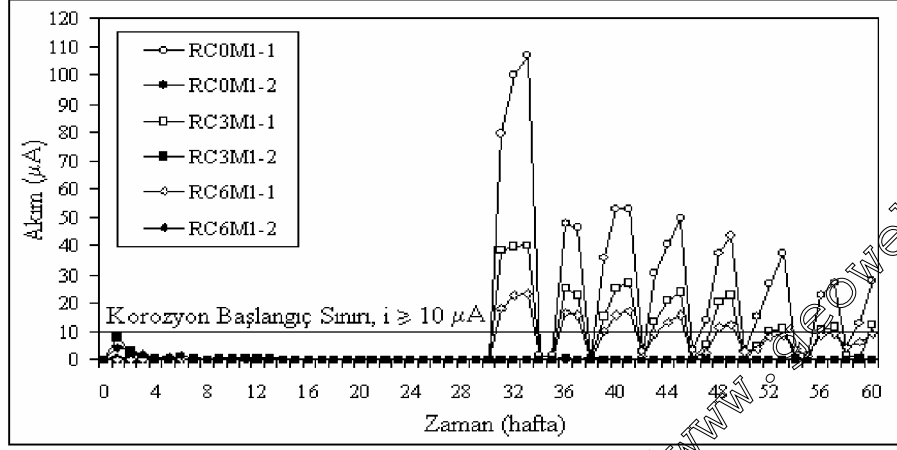
$$i = \frac{E}{R} \quad (4.11)$$



Şekil 4.36 Su ile çevrim uygulanan betonarme numunelerde akım-zaman ilişkisi

Su ile ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan yüksek fırın cürufu katkısız betonarme numunede (RC0W1), Şekil 4.36’da görüldüğü üzere hasar oluşturulması ile akım değeri hızla korozyon başlangıç sınır değerinin üzerine çıkmıştır. 30. haftaya kadar olan sürelerde numunede hesaplanan akım değeri en çok $0.20 \mu A$ 'dır. 30. haftadan 60. haftaya kadar geçen sürede ise akım değeri $1.50 \mu A$ ile $87.60 \mu A$ arasındadır. %30 yüksek fırın cürufu katkılı betonarme numunede (RC3W1), hasar oluşturulmasını izleyen ilk haftada cüruf katkısız numunelere benzer şekilde, akım değeri korozyon başlangıç sınır değerinin üzerine çıkmıştır. 30. haftaya kadar olan sürelerde numunede hesaplanan akım değerleri $0.01 \mu A$ ile $2.60 \mu A$ arasında iken, 30. haftadan 60. haftaya kadar geçen sürede ise akım değeri $0.04 \mu A$ ile $32.90 \mu A$ arasındadır. %60 yüksek fırın cürufu katkılı betonarme numunede (RC6W1), hasar oluşturulması ile diğer gruplardaki numunelere benzer şekilde, akım değeri korozyon başlangıç sınır değerinin üzerine çıkmıştır. 30. haftaya kadar geçen sürede en çok $0.94 \mu A$ olarak hesaplanan akım değeri, 30. haftadan 60. haftaya kadar geçen sürede ise $0.02 \mu A$ ile $22.50 \mu A$ arasındadır. Buna göre cüruf katkılı ve katkısızlarda akımın maksimum değeri incelendiğinde, $87.60 \mu A$ ile en yüksek cüruf katkısız (RC0W1) grubundadır, bunu RC3W1 ve RC6W1 gruplarının $32.90 \mu A$ ve $22.50 \mu A$ 'lik akım değerleri izlemiştir. Betona cüruf katılması ile akımda meydana gelen azalma, %30 ve %60 cüruf katkılılarda sırası ile %62 ve %74'dir.

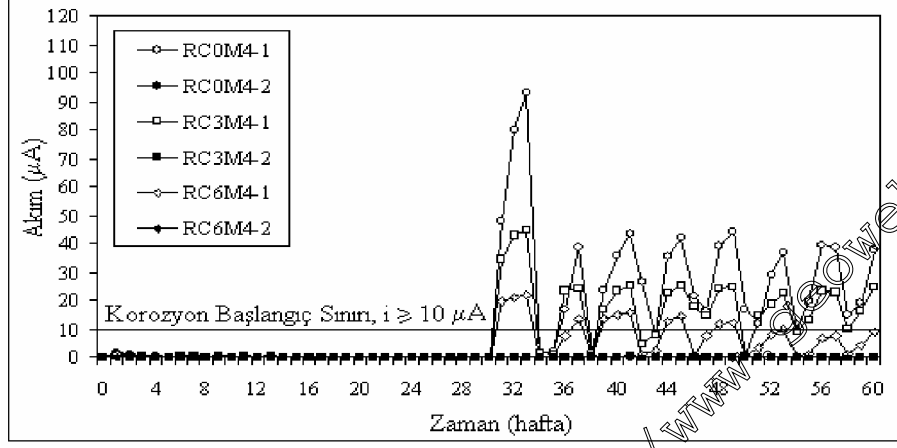
Su ile ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan ve hasar oluşturulmayan cüruf katkılı ve katkısız numunelerin (RC0W-2, RC3W-2, RC6W-2), başlangıçtan itibaren ölçüm süresince standartta verilen sınır değerlerin oldukça altında kaldıkları görülmektedir.



Şekil 4.37 M1 çözeltisi ile çevrim uygulanan betonarme numunelerde akım-zaman ilişkisi

M1 çözeltisi ile ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan yüksek fırın cürufu katkısız betonarme numunede (RC0M1-1), Şekil 4.37’de görüldüğü üzere hasar oluşturulması ile akım değeri korozyon başlangıç sınır değerinin üzerine çok çıkmıştır. 30. haftaya kadar geçen sürede numunede hesaplanan akım, en çok $0.42 \mu A$ değerindedir ve 60. haftaya kadar geçen sürede akım değeri $0.60 \mu A$ ile $107.00 \mu A$ arasındadır. %30 yüksek fırın cürufu katkılı betonarme numunede (RC3M1-1), hasar oluşturulması ile akım değeri, korozyon başlangıç sınır değerinin çok çok üzerine çıkmıştır. 30. haftaya kadar geçen sürede numunede hesaplanan akım değeri en çok $0.31 \mu A$ ’dır ve 60. haftaya kadar geçen sürede ise akım değeri $0.10 \mu A$ ile $40.30 \mu A$ arasındadır. %60 yüksek fırın cürufu katkılı betonarme numunede (RC6M1-1), hasar oluşturulması ile cüruf katkısız numunelere benzer şekilde, akım değeri korozyon başlangıç sınır değerinin üzerine çıkmıştır. 30. haftaya kadar geçen sürede numunede hesaplanan akım değeri en çok $0.30 \mu A$ ’dır. 30. haftadan 60. haftaya kadar olan sürelerde ise akım değeri $0.03 \mu A$ ile $23.30 \mu A$ arasındadır. Buna göre cüruf katkılı ve katkısızlarda akımın maksimum değeri incelendiğinde, $107.00 \mu A$ ile en yüksek cüruf katkısız (RC0M1-1) gruptadır. Bunu RC3M1-1 ve RC6M1-1 grubu numunelerdeki akım değerleri sırası ile $40.30 \mu A$ ve $23.30 \mu A$ ile izlemektedir. Cüruf katılması ile akımda meydana gelen azalma %30 ve %60 cüruf katkılılarda sırası ile %62 ve %78’dir.

M1 çözültisi ile ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan ve hasar oluşturulmayan cüruf katkılı ve katkısız numunelerin (RC0M1-2, RC3M1-2, RC6M1-2), başlangıçtan itibaren ölçüm süresince standartta verilen sınır değerlerin oldukça altında kaldıkları görülmektedir.

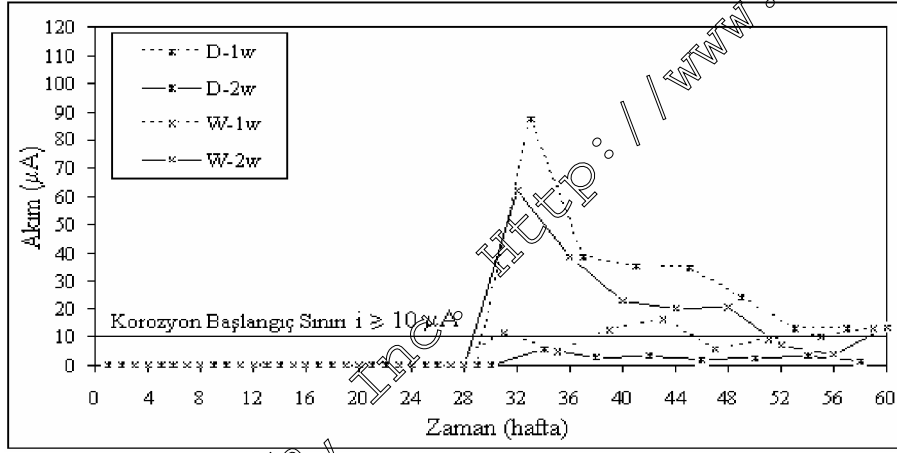


Şekil 4.38 M4 çözültisi ile çevrim uygulanan betonarme numunelerde akım-zaman ilişkisi

M4 çözültisi ile ıslanma-kuruma çevrim uygulanan yüksek fırın cürufu katkısız betonarme numunede (RC0M4-1), hasar oluşturulması ile akım değeri korozyon başlangıç sınır değerinin üzerine çıkmıştır. 30. haftaya kadar geçen sürede numunede hesaplanan akım değeri en çok 0.40 μA 'dır. Bundan sonra 60. haftaya kadar geçen süredeki akım değeri ise 1.18 μA ile 93.20 μA arasındadır. %30 yüksek fırın cürufu katkılı betonarme numunede (RC3M4-1), hasar oluşturulması ile akım değeri korozyon başlangıç sınır değerinin üzerine çıkmıştır. 30. haftaya kadar olan sürelerde numunede hesaplanan akım değeri en çok 0.50 μA ; bundan sonra 60. haftaya kadar geçen sürede ise 0.42 μA ile 44.70 μA arasındadır. %60 yüksek fırın cürufu katkılı betonarme numunede (RC6M4-1), hasar oluşturulması ile cüruf katkısız numunelere benzer şekilde, akım değeri korozyon başlangıç sınır değerinin üzerine çıkmıştır. 30. haftaya kadar geçen sürede numunede hesaplanan akım değerleri 0.01 μA ile 0.87 μA arasındadır ve kritik değerin çok altındadır. 30. haftadan 60. haftaya kadar geçen sürede ise akım değeri 0.02 μA ile 22.00 μA arasındadır. Buna göre cüruf katkılı ve katkısızlarda akımın maksimum değeri incelendiğinde, 93.20 μA ile en yüksek cüruf katkısız (RC0M4-1) gruptadır. Bunu RC3M4-1 ve RC6M4-1 sırası ile 44.70 μA ve 22.00 μA ile takip etmektedir. Cüruf katılması ile akımda meydana gelen azalma %30 ve %60 cüruf katkılılarda sırası ile %52 ve %76'dır.

M4 çözültisi ile ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan ve hasar oluşturulmayan cüruf katkılı ve katkısız (RC0M4-2, RC3M4-2, RC6M4-2) numunelerdeki başlangıçtan itibaren ölçülen akım değeri standartta verilen sınır değerlerin çok altında kaldığı görülmektedir (Şekil 4.8).

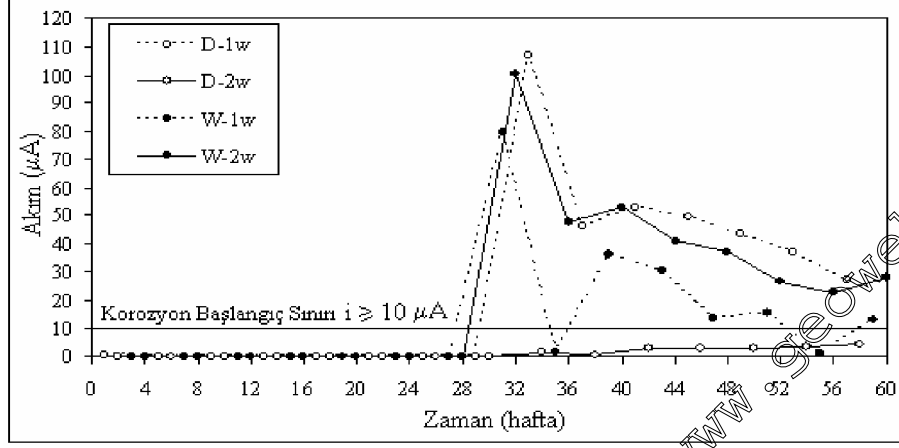
Bölüm 3'te açıklandığı gibi, su, M1 ve M4 çözeltisi ile çevrim uygulanan yüksek fırın cürufu katkılı ve katkısız betonarme numunelerde, hasarlı yapıları temsil etmek üzere 30. haftada hasar oluşturulmuş, hasar oluşturulmasından itibaren, anot ile katot arasındaki potansiyel fark artmış, sistemdeki akım değerlerinde ani sıçramalar meydana gelmiş, korozyon başlangıcı için sınır değer olan $10 \mu\text{A}$ 'in üzerine çıkmıştır. İslanma-kuruma sürecindeki salınımlar dikkate alınarak her bir sürecin etkisini görmek amacı ile haftalık ölçümler, zamana göre ayrı ayrı irdelenmiştir. İslanma süreci (W), birinci haftadaki ölçümler için; W-1w, ikinci haftadaki ölçümler için; W-2w, kuruma süreci için (D), birinci haftadaki ölçümler için; D-1w, ikinci haftadaki ölçümler için; D-2w ile gösterilmiş, bunların zamana bağlı değişimi Şekil 4.39-4.47'de verilmiştir.



Şekil 4.39 Su ile çevrim uygulanan YFC katkısız hasarlı betonarme numunelerde i-t ilişkisi

Su ile ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan yüksek fırın cürufu katkısız betonarme numunede (RC0W), Şekil 4.39'da görüldüğü gibi hasar oluşturulması ile akım değeri korozyon başlangıç sınır değerinin çok çok üzerine çıkmıştır. Bu numunelerde 30. haftaya kadar en çok $0.20 \mu\text{A}$ olan akım değerleri, 30. hafta ile 60. hafta arasında geçen 30 haftalık sürede $1.50 \mu\text{A}$ ile $87.60 \mu\text{A}$ arasında değerler almıştır. 30. haftada kuruma fazında $0.03 \mu\text{A}$ ile korozyon başlangıç sınır değerinin çok altında olan akım değeri, 31. haftada ıslanma periyotunun birinci haftasında $11.55 \mu\text{A}$ değerine, 32. haftada yani ıslanma periyotunun 2. haftasında $61.92 \mu\text{A}$ değerine çıkmıştır. Kuruma periyotunun birinci haftasında, yani 33. haftada ise akım değeri $87.60 \mu\text{A}$ ile 60 haftalık süre boyunca ölçülen en büyük değere ulaşmıştır. 33. haftadaki bu yüksek değer, numunenin tam olarak kurumadığının bir göstergesidir. Pik değerine ulaşan akım, ilerleyen zamanlarda düşüş göstermiş, 60. haftada $10 \mu\text{A}$ 'lik sınır değere yaklaşmıştır. Bu durum, anot bölgesinden katot bölgesine gidildikçe ortamda bulunan su ve oksijen

konsantrasyon farkının azaldığının da bir göstergesidir. Hasarın oluşturulması ile meydana gelen ani konsantrasyon farkı zaman içerisinde azalmış, anot ile katot bölgeleri arasındaki konsantrasyon farkından doğan elektropotansiyel farkı azalmıştır.

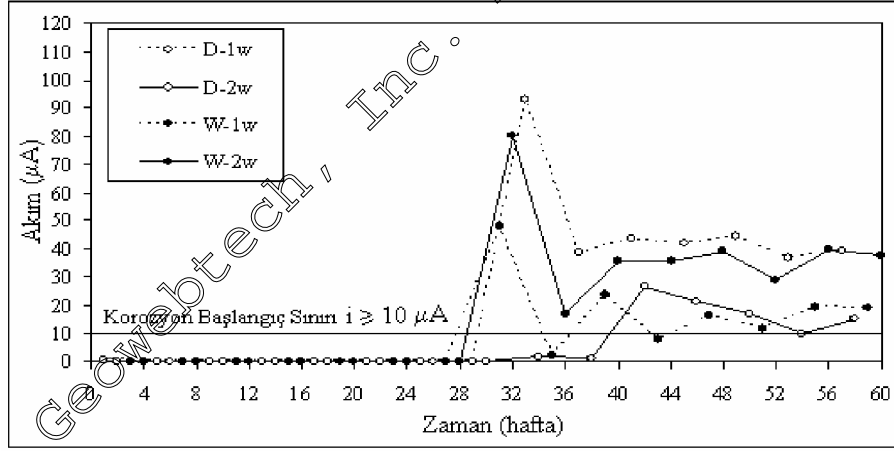


Şekil 4.40 M1 çözeltisi ile çevrim uygulanan YFC katkısız hasarlı betonarme numunelerinde i-t ilişkisi

M1 çözeltisi ile ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan ve akım değerleri süreçlere ayrılarak değerlendirilen yüksek fırın cürufu katkısız betonarme numunede (RCOM1), Şekil 4.40'ta görüldüğü gibi, hasar oluşturulması ile akım değeri, korozyon başlangıç sınır değerinin üzerine çıkmıştır. Hasar oluşturulmadan önce 30. haftaya kadar numunede hesaplanan en büyük akım değeri $0.42 \mu\text{A}$ iken, 30. haftadan 60. haftaya kadar geçen sürede $0.60 \mu\text{A}$ ile $107.00 \mu\text{A}$ arasında değerler almıştır. 30. haftada hesaplanan akım değeri $0.01 \mu\text{A}$ ile korozyon başlangıç sınır değerinin çok altında iken, 31. haftada yani ıslanma periyodunun birinci haftasında $79.50 \mu\text{A}$, 32. haftada; ıslanma periyodunun 2. haftasında daha da artarak $100.00 \mu\text{A}$ değerine çıkmıştır. ıslanma-kuruma çevriminin ıslanma periyodu tamamlanıp 33. haftada kuruma periyodunun birinci haftası tamamlandığında akım değeri $107.00 \mu\text{A}$ ile 60 haftalık eskitme sürecinde belirlenen maksimum değere ulaşmıştır. Kuruma periyodunun birinci, eskitme sürecinin 33. haftasındaki bu yüksek değer, numunenin tam olarak kurumadığının bir göstergesidir. Ayrıca 33. haftada pik değerine ulaşan akım değeri, ilerleyen zamanlarda düşüş göstermektedir ki bu durum anot bölgesinden katot bölgesine gidildikçe ortamdaki konsantrasyon farkının azaldığının da bir göstergesidir.

Betonarme numunelerde klorür konsantrasyonunun 3 farklı derinlik için verildiği Çizelge Ek 7 incelendiğinde, klorür konsantrasyonu 10.000 mg/L olan MgCl_2 çözeltisi ile ıslanma-kuruma uygulanan cüruf katkısız hasarlı betonarme numunenin (RCOM1), 15 çevrim sonunda

20-30 mm'lik derinlikteki klorür konsantrasyonu 290 mg/L değerinde iken hasarsız numunede bu değer 312 mg/L'dir ve hasarlı numuneye göre bir miktar yüksektir. Bu durum, 2.13 bağıntısından da anlaşılacağı üzere klorür iyonlarının donatı üzerinde birikmesi sonucu meydana gelmektedir. Klorür konsantrasyonundaki benzer durum, 0-10 mm ve 10-20 mm derinlikteki bölgeler için de geçerlidir. Hinczak ve Cao (1992) tarafından yapılan deneysel çalışmada belirtildiği gibi, cürufli çimentolar ile üretilen betonlarda, 0-10 mm'lik bölgedeki klorür iyon konsantrasyonunu %60 ve daha az cüruf içerenlerde, normal Portland çimento lu betona göre daha fazla, ancak %80 ve %90 oranında cüruf katkılı betonlarda tam tersine klorür iyon konsantrasyonu daha düşüktür ve cüruf kullanımının faydalı etkisi 20-30 ve 40-50 mm'lik bölgelerde görülmektedir. Hasarlı ve hasarsız numunelerden çıkarılan donatıların incelenmesinden RCOM1-1 numunesinden çıkarılan anot donatısında korozyon oluşan bölge boyu 33 mm'dir (Şekil 4.51 ve Çizelge Ek 7), bu numunedeki anot donatıda korozyon oluşan bölge boyu, su ile ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan numunedeki anot donatının korozyon oluşan bölge boyundan daha büyüktür. M1 çözeltisi ile ıslanma-kuruma uygulanan hasarsız numunelerin hiçbirisinde anot donatıda korozyon gözlenmemiştir.

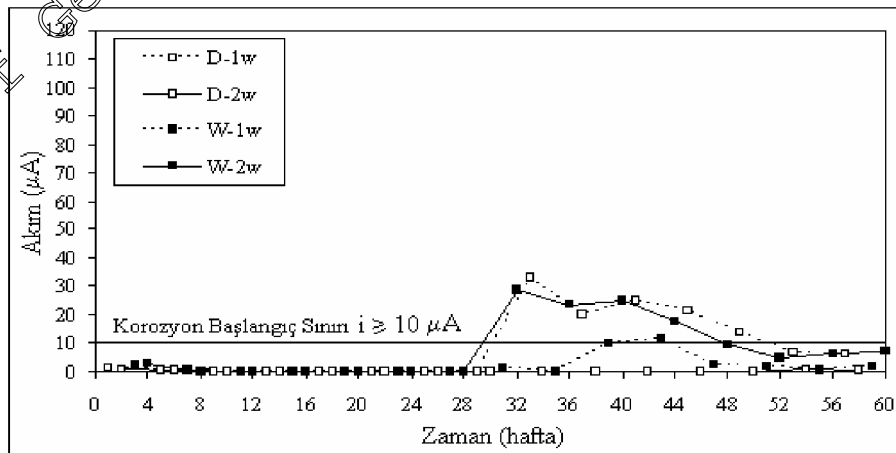


Şekil 4.41 M4 çözeltisi ile çevrim uygulanan YFC katkısız hasarlı betonarme numunelerde i-t ilişkisi ilişkisi

M4 çözeltisi ile ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan ve akım değerleri süreçlere ayrılarak değerlendirilen yüksek fırın cürufu katkısız betonarme numunede (RCOM4), Şekil 4.41'de görüldüğü gibi hasar oluşturulması ile akım değeri, korozyon başlangıç sınır değerinin üzerine çıkmıştır. Hasar oluşturulmadan önce 30. haftaya kadar numunede hesaplanan en büyük akım değeri 0.40 µA iken, 30. haftadan 60. haftaya kadar geçen sürede 1.18 µA ile 93.20 µA arasında değerler almıştır. 30. haftada hesaplanan akım değeri, 0.01 µA ile korozyon başlangıç sınır değerinin çok altında iken, 31. haftada yani ıslanma periyotunun birinci

haftasında 47.90 μA , 32. haftada; ıslanma periyotunun 2. haftasında daha da artarak 80.20 μA değerine çıkmıştır. Islanma-kuruma çevriminin ıslanma periyodu tamamlanıp 33. haftada kuruma periyotunun birinci haftası tamamlandığında akım değeri 93.20 μA ile 60 haftalık eskitme sürecinde belirlenen maksimum değere ulaşmıştır. 33. haftadaki bu yüksek değer, numunenin tam olarak kurumadığının bir göstergesidir. Ayrıca 33. haftada pik değerine ulaşan akım değeri, ilerleyen zamanlarda düşüş göstermektedir ki bu durum anot bölgesinden katot bölgesine gidildikçe ortamdaki konsantrasyon farkının azaldığının da bir göstergesidir.

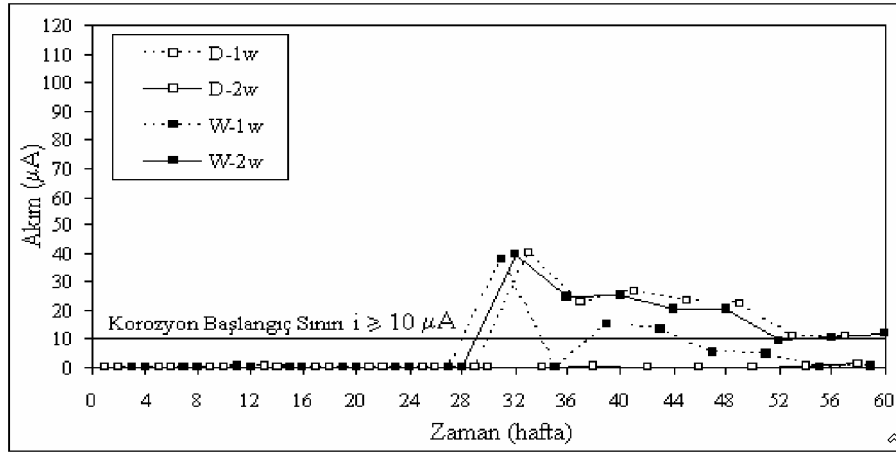
Betonarme numunelerde klorür konsantrasyonunun 3 farklı derinlik için verildiği Çizelge Ek 7 incelendiğinde, klorür konsantrasyonu 40.000 mg/L olan MgCl₂ çözeltisi ile ıslanma-kuruma uygulanan cüruf katkısız hasarlı betonarme numunenin (RC0M4), 15 çevrim sonunda 20-30 mm'lik derinlikte klorür konsantrasyonu 383 mg/L değerindeki iken hasarsız numunede bu değer 339 mg/L'dir ve hasarlı numuneye göre bir miktar düşüktür. Aynı durum 0-10 mm ve 10-20 mm derinlikteki bölgeler için geçerli değildir. 0-10 mm'lik derinlikte hasarlı numunede klorür konsantrasyonu 1009 mg/L değerindeki iken hasarsız numunede bu değer 1039 mg/L, 10-20 mm'lik derinlikte hasarlı numunede klorür konsantrasyonu 589 mg/L değerindeki iken hasarsız numunede bu değer 639 mg/L'dir ve hasarlı numuneye göre bir miktar yüksektir. Bu durum, 2.13 başından da anlaşılacağı üzere klorür iyonlarının donatı üzerinde birikmesi sonucu meydana gelmektedir. Hasarlı ve hasarsız numunelerden çıkarılan donatıların incelenmesinden RC0M4 numunesinden çıkarılan anot donatısında korozyon oluşan bölge boyu 37 mm ile su ve M1 çözeltisi ile ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan hasarlı numunelerinkinden daha büyüktür (Şekil 4.51 ve Çizelge Ek 7). Hasarsız numunelerin hiçbirisinde anot donatıda korozyon gözlenmemiştir.



Şekil 4.42 Su ile çevrim uygulanan %30 YFC katkılı hasarlı betonarme numunelerde i-t ilişkisi

Su ile ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan ve akım değerleri süreçlere ayrılarak değerlendirilen %30 yüksek fırın cürufu katkılı betonarme numunede (RC3W), Şekil 4.42'de görüldüğü gibi hasar oluşturulması ile cüruf katkısız numunelere benzer şekilde, akım değeri korozyon başlangıç sınır değerinin üzerine çıkmıştır. Hasar oluşturulmadan önce 30. haftaya kadar geçen sürede numunede hesaplanan akım değerleri $0.01 \mu\text{A}$ ile $2.60 \mu\text{A}$ arasındadır. 30. haftadan 60. haftaya kadar geçen sürede $0.04 \mu\text{A}$ ile $32.90 \mu\text{A}$ arasında değerler almıştır. 30. haftada hesaplanan akım değeri $0.02 \mu\text{A}$ ile korozyon başlangıç sınır değerinin çok altında iken, 31. haftada yani ıslanma periyotunun birinci haftasında $1.20 \mu\text{A}$, 32. haftada; ıslanma periyotunun 2. haftasında daha da artarak $28.70 \mu\text{A}$ değerine çıkmıştır. ıslanma-kuruma çevriminin ıslanma periyodu tamamlanıp 33. haftada kuruma periyodunun birinci haftası tamamlandığında akım değeri $32.90 \mu\text{A}$ ile 60 haftalık eskime sürecinde belirlenen maksimum değere ulaşmıştır. 33. haftadaki bu yüksek değer, numunenin tam olarak kurumadığının bir göstergesidir. Pik değerine ulaşan akım, ilerleyen zamanlarda düşüş göstermiş, 60.haftada $10 \mu\text{A}$ 'lık sınır değer altına düşmüştür. Bu durum, anot bölgesinden katot bölgesine gidildikçe ortamda bulunan su ve oksijen konsantrasyon farkının azaldığının da bir göstergesidir. Hasarın oluşturulması ile meydana gelen ani konsantrasyon farkı zaman içerisinde azalmış, anot ile katot bölgeleri arasında konsantrasyon farkından doğan elektropotansiyel fark azalmıştır.

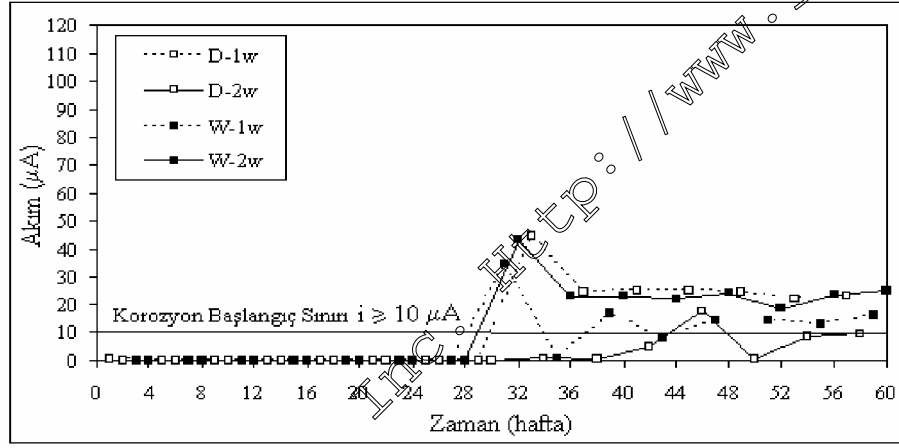
Akım değerleri cüruf katkısız RC0W numunesi ile karşılaştırıldığında, 33. haftadaki maksimum akım değerinin $87.60 \mu\text{A}$ değerinden $32.90 \mu\text{A}$ değerine düştüğü görülmektedir. Bu da beton üretiminde yüksek fırın cürufu kullanılmasının, anot-katot arasındaki elektron hareketini azaltarak donatı korozyonunun verdiği hasarı azaltması şeklinde açıklanabilir. Anot donatılarda korozyon oluşan bölge boyunun verildiği Şekil 4.51 ve Çizelge Ek 7 incelendiğinde, klorürlü çözeltilerle ıslanma-kuruma etkisine maruz kalan numunelerden çıkarılan anot donatılarda korozyon oluşan bölge boyu, katkısız numuneninkinden daha kısadır. Su ile ıslanma-kuruma uygulanan numunelerde ise cüruf katkılı numuneden çıkarılan anot donatıdaki korozyon oluşan bölge boyu 17 mm ile cüruf katkısız numuneden çıkarılan anot donatıdaki korozyon oluşan bölge boyundan daha büyüktür. Buradan, cürufun yüksek klorür konsantrasyonunda korozyona olumlu etki ettiği açıkça görülmektedir.



Şekil 4.43 M1 çözültisi ile çevrim uygulanan %30 YFC katkılı hasarlı betonarme numunelerde i-t ilişkisi

Şekil 4.43'te M1 çözültisi ile ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan %30 yüksek fırın cürufu katkılı betonarme numunede (RC3M1), hasar oluşturulması ile akım değeri korozyon başlangıç sınır değerinin üzerine çıkmıştır. Bu numunede, 30. haftaya kadar en büyük 0.31 μA olan akım değeri, 30. haftaya kadar en büyük 0.31 μA olan akım değeri, 30. hafta ile 60. hafta arasında geçen 30 haftalık sürede 0.10 μA ile 40.30 μA arasında değerler almıştır. 30. haftada kuruma fazında 0.16 μA ile korozyon başlangıç sınır değerinin çok altında olan akım değeri, 31. haftada ıslanma periyotunun birinci haftasında 38.10 μA değerine, 32. haftada yani ıslanma periyotunun 2. haftasında 39.60 μA değerine çıkmıştır. Kuruma periyodunun birinci haftasında yani 33. haftada ise akım değeri 40.30 μA ile 60 haftalık süre boyunca ölçülen en büyük değere ulaşmıştır. 33. haftadaki bu yüksek değer, numunenin tam olarak kurumadığının bir göstergesidir. Akım değerleri cüruf katkısız RC0M1 numunesi ile karşılaştırıldığında, 33. haftadaki maksimum akım değerinin 107.60 μA değerinden 40.30 μA değerine düştüğü görülmektedir. Pik değerine ulaşan akım, ilerleyen zamanlarda düşüş göstermiş; 60. haftada 10 μA 'lık sınır değere çok yaklaşmıştır. Bu durum, anot bölgesinden katot bölgesine gidildikçe ortamdaki konsantrasyon farkının azaldığının da bir göstergesidir. Betonarme numunelerde klorür konsantrasyonunun 3 farklı derinlik için verildiği Çizelge Ek 7 incelendiğinde, klorür konsantrasyonu 10.000 mg/L olan MgCl_2 çözültisi ile ıslanma-kuruma uygulanan %30 cüruf katkılı hasarlı betonarme numunenin (RC3M1-1), 15 çevrim sonunda 20-30 mm'lik derinlikte klorür konsantrasyonu 19 mg/L değerindeki iken hasarsız numunede bu değer 34 mg/L'dir ve hasarlı numuneye göre bir miktar yüksektir. Aynı durum 0-10 mm ve 10-20 mm derinlikteki bölgeler için geçerli değildir. Hasarlı numunede, 0-10 mm'lik derinlikte klorür konsantrasyonu 752 mg/L değerindeki iken hasarsız numunede bu değer 684 mg/L, 10-20 mm'lik derinlikte klorür

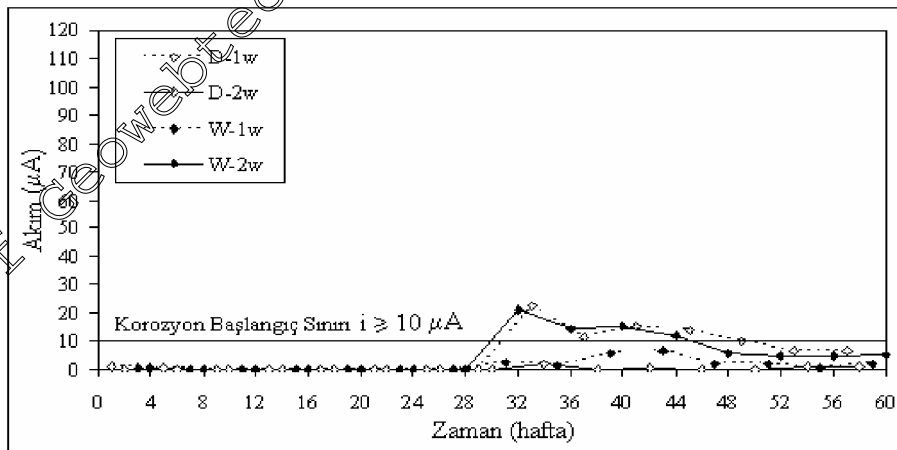
konsantrasyonu 174 mg/L değerindeki iken hasarsız numunede bu değer 163 mg/L'dir. Bu durum, 2.13 bağıntısından da anlaşılacağı üzere klorür iyonlarının donatı üzerinde birikmesi sonucu meydana gelmektedir. Hasarlı ve hasarsız numunelerden çıkarılan donatıların incelenmesinden RC3M1-1 numunesinden çıkarılan anot donatısında korozyon oluşan bölge boyu 22 mm iken (şekil 4.51 ve izelge Ek 7), hasarsız numunelerin hiçbirisinde anot donatıda korozyon gözlenmemiştir. Bu numunedeki anot donatıda korozyon oluşan bölge boyu, M1 ile ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan cüruf katkısız numunedeki anot donatının korozyon oluşan bölge boyundan daha küçük değerdedir. Bu da beton üretiminde yüksek fırın cürufu kullanılmasının, klorür etkisinde anot-katot arasındaki elektron hareketini azaltarak donatı korozyonunun verdiği hasarı azaltması şeklinde açıklanabilir.



şekil 4.44 M4 zeltisi ile çevrim uygulanan %30 YFC katkılı hasarlı betonarme numunelerde i-t ilişkisi

şekil 4.44'te M4 zeltisi ile ıslanma-kuruma çevrim uygulanan %30 yüksek fırın cürufu katkılı betonarme numunede (RC3M4), hasar oluşturulması ile akım değeri korozyon başlangıç sınır değerinin üzerine çıkmıştır. Bu numunede 30. haftaya kadar hesaplanan akım değerleri en büyük 0.50 μA 'dır. 30. hafta ile 60. hafta arasında geçen 30 haftalık sürede 0.42 μA ile 44.70 μA arasında değerler almıştır. 30. haftada kuruma fazında 0.07 μA ile korozyon başlangıç sınır değerinin çok altında olan akım değeri, 31. haftada ıslanma peryotunun birinci haftasında 34.40 μA değerine, 32. haftada yani ıslanma peryotunun 2. haftasında 43.00 μA değerine çıkmıştır. Kuruma peryotunun birinci haftasında yani 33. haftada ise akım değeri 44.70 μA ile 60 haftalık süre boyunca ölçülen en büyük değere ulaşmıştır. 33. haftadaki bu yüksek değer, numunenin tam olarak kurumadığının bir göstergesidir. Pik değerine ulaşan akım, ilerleyen zamanlarda düşüş göstermiş, 60. haftada sınır değerinin bir miktar üzerinde değer almıştır. Bu durum, anot bölgesinden katot bölgesine gidildikçe ortamda bulunan klorür

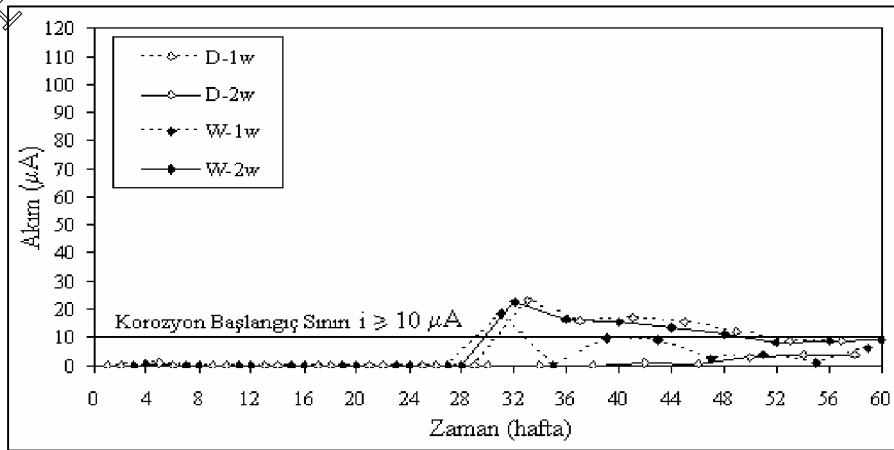
konsantrasyon farkının azaldığının da bir göstergesidir. Akım değerleri cüruf katkısız RCOM4 numunesi ile karşılaştırıldığında, 33. haftadaki maksimum akım değerinin 93.20 μA değerinden 44.70 μA değerine düştüğü görülmektedir. Betonarme numunelerde klorür konsantrasyonunun 3 farklı derinlik için verildiği Çizelge Ek 7 incelendiğinde, klorür konsantrasyonu 40.000 mg/L olan MgCl_2 çözeltisi ile ıslanma-kuruma uygulanan %30 cüruf katkılı hasarlı betonarme numunenin (RC3M4-1), 15 çevrim sonunda 20-30 mm'lik derinlikte klorür konsantrasyonu 73 mg/L değerindeki iken hasarsız numunede bu değer 134 mg/L'dir ve hasarlı numuneye göre bir miktar düşüktür. Benzer durum 0-10 mm ve 10-20 mm derinlikteki bölge için geçerli değildir. 0-10 mm'lik derinlikte hasarlı numunede klorür konsantrasyonu 1039 mg/L değerindeki iken hasarsız numunede bu değer 974 mg/L, 10-20 mm'lik bölgede klorür konsantrasyonu 309 mg/L değerinde iken hasarsız numunede bu değer 289 mg/L'dir ve hasarlı numuneye göre bir miktar düşüktür. Bu durum ise 2.13 bağıntısından da anlaşılacağı üzere klorür iyonlarının donatı üzerinde birikmesi sonucu meydana gelmektedir. Hasarlı ve hasarsız numunelerden çıkarılan donatıların incelenmesinden RC3M4-1 numunesinden çıkarılan anot donatısında korozyon oluşan bölge boyu 27 mm'dir (Şekil 4.51 ve Çizelge Ek 7), su ve M1 çözeltisi ile ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan hasarlı numunelerden daha büyüktür; ancak cüruf katılmamış numuneden çıkarılan anot donatıda, korozyon oluşan bölge boyuna kıyasla daha düşük değerdedir. Hasarsız numunelerin hiçbirisinde anot donatıda korozyon gözlenmemiştir.



Şekil 4.45 Su ile çevrim uygulanan %60 YFC katkılı hasarlı betonarme numunelerde i-t ilişkisi

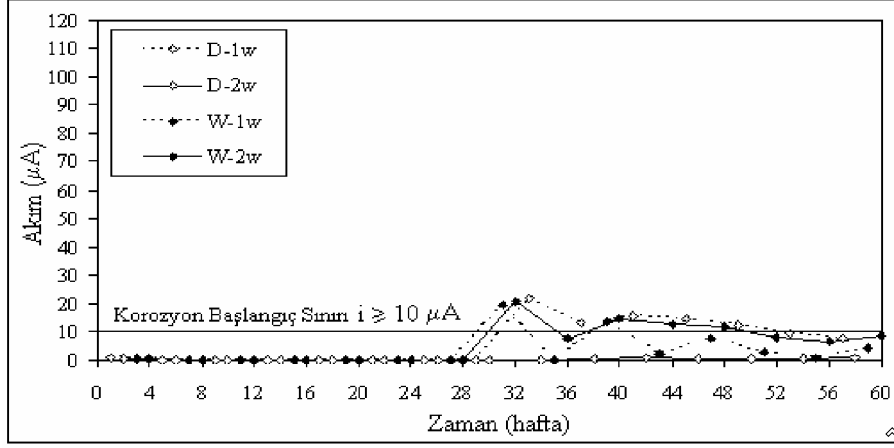
Su ile ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan ve akım değerleri süreçlere ayrılarak değerlendirilen %60 yüksek fırın cürufu katkılı betonarme numunede (RC6W1), Şekil 4.45'te görüldüğü gibi, hasar oluşturulması ile cüruf katkısız numunelere benzer şekilde, akım değeri

korozyon başlangıç sınır değerinin üzerine çıkmıştır. Hasar oluşturulmadan önce 30. haftaya kadar geçen sürede numunede hesaplanan en büyük akım değeri $0.94 \mu\text{A}$ iken, 30. haftadan 60. haftaya kadar geçen sürede $0.02 \mu\text{A}$ ile $22.50 \mu\text{A}$ arasında değerler almıştır. 30. haftada hesaplanan akım değeri, $0.08 \mu\text{A}$ ile korozyon başlangıç sınır değerinin çok altında iken, 31. haftada yani ıslanma periyodunun birinci haftasında $2.40 \mu\text{A}$, 32. haftada; ıslanma periyotunun 2. haftasında daha da artarak $21.10 \mu\text{A}$ değerine çıkmıştır. Islanma-kuruma çevriminin ıslanma periyodu tamamlandıktan sonra 33. haftada kuruma periyodunun birinci haftası tamamlandığında, akım değeri $22.50 \mu\text{A}$ ile 60 haftalık eskitme sürecinde belirlenen maksimum değere ulaşmıştır. Kuruma periyotunun birinci, eskitme sürecinin 33. haftasındaki bu yüksek değer, numunenin tam olarak kurumadığının bir göstergesidir. Pik değerine ulaşan akım, ilerleyen zamanlarda düşüş göstermiş, 60. haftada $10 \mu\text{A}$ 'lık sınır değerinin altında değer almıştır. Bu durum anot bölgesinden katot bölgesine gidildikçe ortamda bulunan su ve oksijen konsantrasyon farkının azaldığının da bir göstergesidir. Hasarın oluşturulması ile meydana gelen ani konsantrasyon farkı zaman içerisinde azalmış; anot ile katot bölgeleri arasında konsantrasyon farkından doğan elektropotansiyel fark azalmıştır. Akım değerleri cüruf katkısız RC0W ve %30 cüruf katkılı RC3W numunesi ile karşılaştırıldığında, 33. haftadaki maksimum akım değerinin $87.60 \mu\text{A}$ değerinden sırası ile $32.90 \mu\text{A}$ ve $22.50 \mu\text{A}$ değerine düştüğü görülmektedir. Bu da beton üretiminde yüksek fırın cürufu kullanılmasının ve oranının artırılmasının, anot-katot arasındaki elektron hareketini azaltarak donatı korozyonunun verdiği hasarı azaltması şeklinde açıklanabilir. Şekil 4.51 ve Çizelge Ek 7 incelendiğinde, %60 cüruf katkılı numuneden çıkarılan anot donatıdaki korozyon oluşan bölge boyunun 15 mm ile %30 cüruf katkılı numuneden çıkarılan anot donatıdaki korozyon oluşan bölge boyundan daha küçük değerde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.46 M1 çözeltisi ile çevrim uygulanan %60 YFC katkılı hasarlı betonarme numunelerde i-t ilişkisi

Şekil 4.46'da M1 çözeltisi ile ıslanma-kuruma çevrim uygulanan %60 yüksek fırın cürufu katkılı betonarme numunede (RC6M1), hasar oluşturulması ile cüruf katkısız numunelere benzer şekilde, akım değeri korozyon başlangıç sınır değerinin üzerine çıkmıştır. Bu numunede, 30. haftaya kadar en büyük akım değerleri 0.30 μA 'dır. 30. hafta ile 60. hafta arasında geçen 30 haftalık sürede 0.03 μA ile 23.30 μA arasında değerler almıştır. 30. haftada kuruma fazında 0.07 μA ile korozyon başlangıç sınır değerinin çok altında olan akım değeri, 31. haftada, ıslanma periyodunun birinci haftasında 18.10 μA değerine, 32. haftada yani ıslanma periyodunun 2. haftasında 22.50 μA değerine çıkmıştır. Kuruma periyodunun birinci haftasında yani 33. haftada ise akım değeri 23.30 μA ile 60 haftalık süre boyunca ölçülen en büyük değere ulaşmıştır. 33. haftadaki bu yüksek değer, numunenin tam olarak kurumadığının bir göstergesidir. Pik değerine ulaşan akım, ilerleyen zamanlarda düşüş göstermiş, 60. haftada akımın sınır değerinin az da olsa altında değer almıştır. Bu durum, anot bölgesinden katot bölgesine gidildikçe ortamdaki konsantrasyon farkının azaldığının da bir göstergesidir. Betonarme numunelerde klorür konsantrasyonunun 3 farklı derinlik için verildiği Çizelge Ek 7 incelendiğinde, klorür konsantrasyonu 10.000 mg/L olan MgCl_2 çözeltisi ile ıslanma-kuruma uygulanan cüruf katkısız hasarlı betonarme numunenin (RC6M1-1), 15 çevrim sonunda 20-30 mm'lik derinlikte klorür konsantrasyonu 36 mg/L değerindeki iken hasarsız numunede bu değer 50 mg/L'dir ve hasarlı numuneye göre bir miktar yüksektir. Aynı durum 0-10 mm için de geçerlidir ancak 10-20 mm derinlikteki bölgede, hasarlı numunede klorür konsantrasyonu 422 mg/L iken hasarsız numunede 501 mg/L değeri ile hasarlı numuneye göre bir miktar yüksektir. Hasarın oluşturulması ile birlikte meydana gelen ani konsantrasyon farkı zaman içerisinde azalarak anot ile katot bölgeleri arasındaki elektropotansiyel değerini azaltmış böylelikle hesaplanan akım değeri pikten sonra azalmaya başlamıştır. Akım değerleri cüruf katkısız RC0M1-1 ve %30 cüruf katkılı RC3M1-1 numuneleri ile karşılaştırıldığında, 33. haftadaki maksimum akım değerinin 107.00 μA değerinden sırası ile 40.30 μA ve 23.30 μA değerine düştüğü görülmektedir. Bu da beton üretiminde yüksek fırın cürufu kullanılmasının ve oranının artırılmasının, anot-katot arasındaki elektron hareketini azaltarak donatı korozyonunun verdiği hasarı azaltması şeklinde açıklanabilir. Şekil 4.51 ve Çizelge Ek 7 incelendiğinde, %60 cüruf katkılı numuneden çıkarılan anot donatıdaki korozyon oluşan bölge boyunun 20 mm ile cüruf katkısız ve %30 cüruf katkılı numuneden çıkarılan anot donatıdaki korozyon oluşan bölge boyundan daha küçük değerde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.47 M4 çözültisi ile çevrim uygulanan %60 YFC katkılı hasarlı betonarme numunelerinde i-t ilişkisi

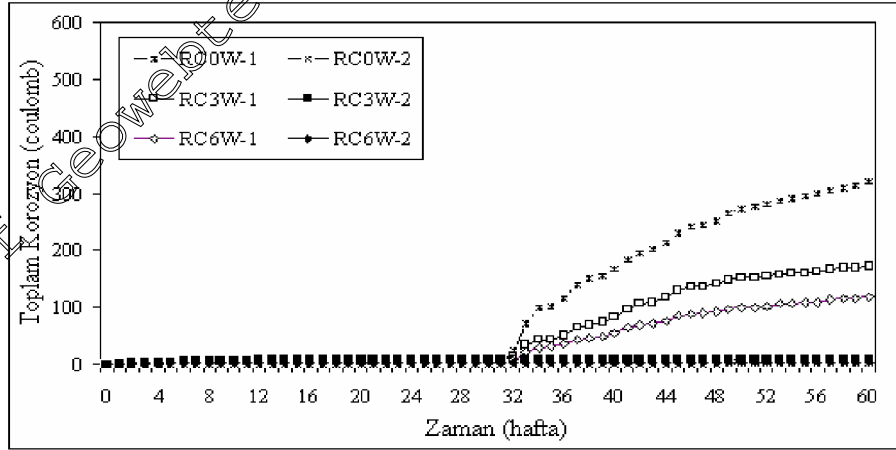
M4 çözültisi ile ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan ve akım değerleri süreçlere ayrılarak değerlendirilen %60 yüksek fırın cürufu katkılı betonarme numunede (RC6M4), Şekil 4.47’de görüldüğü gibi, hasar oluşturulması ile cüruf katkısız numunelere benzer şekilde, akım değeri korozyon başlangıç sınır değerinin üzerine çıkmıştır. Hasar oluşturulmadan önce 30. haftaya kadar geçen sürede numunede hesaplanan akım değerleri $0.01 \mu A$ ile $0.87 \mu A$ arasındadır. 30. haftadan 60. haftaya kadar geçen sürede akım değeri $0.02 \mu A$ ile $22.00 \mu A$ arasında değerler almıştır. 30. haftada hesaplanan akım değeri, $0.01 \mu A$ ile korozyon başlangıç sınır değerinin çok altında iken, 31. haftada yani ıslanma periyodunun birinci haftasında $19.60 \mu A$, 32. haftada; ıslanma periyodunun 2. haftasında daha da artarak $20.80 \mu A$ değerine çıkmıştır. ıslanma-kuruma çevriminin ıslanma periyodu tamamlanıp 33. haftada kuruma periyodunun birinci haftası tamamlandığında, akım değeri $22.00 \mu A$ ile 60 haftalık eskitme sürecinde belirlenen maksimum değere ulaşmıştır. 33. haftasındaki bu yüksek değer, numunenin tam olarak kurumadığının bir göstergesidir. Ayrıca 33. haftada pik değerine ulaşan akım değeri, ilerleyen zamanlarda düşüş göstermektedir ki bu durum anot bölgesinden katot bölgesine gittikçe ortamdaki konsantrasyon farkının azaldığının da bir göstergesidir. Betonarme numunelerde klorür konsantrasyonunun 3 farklı derinlik için verildiği Çizelge Ek 7 incelendiğinde, klorür konsantrasyonu 40.000 mg/L olan $MgCl_2$ çözültisi ile ıslanma-kuruma uygulanan cüruf katkısız hasarlı betonarme numunenin (RC6M4-1), 15 çevrim sonunda 20-30 mm’lik derinlikte klorür konsantrasyonu 51 mg/L değerindeki iken hasarsız numunede bu değer 68 mg/L ’dir ve hasarlı numuneye göre bir miktar yüksektir. Aynı durum 10-20 mm için de geçerlidir ancak 0-10 mm derinlikteki bölgede, hasarlı numunede klorür konsantrasyonu 976 mg/L iken hasarsız numunede 1002 mg/L değeri ile hasarlı numuneye göre bir miktar

yüksektir. Hasarın oluşturulması ile birlikte meydana gelen ani konsantrasyon farkı zaman içerisinde azalarak anot ile katot bölgeleri arasındaki elektropotansiyel değerini azaltmış böylelikle hesaplanan akım değeri pikten sonra azalmaya başlamıştır. Akım değerleri cüruf katkısız RC0M4-1 ve %30 cüruf katkılı RC3M4-1 numuneleri ile karşılaştırıldığında, 33. haftadaki maksimum akım değerinin 93.20 μA değerinden sırası ile 44.70 μA ve 22.00 μA değerine düştüğü görülmektedir. Bu da beton üretiminde yüksek fırın cürufu kullanılmasının ve oranının artırılmasının, anot-katot arasındaki elektron hareketini azaltarak donatı korozyonunun verdiği hasarı azaltması şeklinde açıklanabilir. Şekil 4.51 ve Çizelge Ek 7 incelendiğinde, %60 cüruf katkılı numuneden çıkarılan anot donatıdaki korozyon oluşan bölge boyunun 20 mm ile cüruf katkısız ve %30 cüruf katkılı numuneden çıkarılan anot donatıdaki korozyon oluşan bölge boyundan daha küçük değerde olduğu görülmektedir.

Sistemden belirli zaman aralığında geçen akımın ardışık olarak toplanması ile elde edilen ve toplam korozyon olarak adlandırılan akımın toplam değeri (coulomb), her ölçüm aralığı için 4.12 bağıntısından kümülatif olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan toplam korozyonun zamanla değişimi Şekil 4.48-4.50’de verilmiştir.

$$TC_j = TC_{j-1} + [(t_j - t_{j-1}) * (i_j + i_{j-1}) / 2] \quad (4.12)$$

Bağıntıda TC (coulomb), toplam korozyonu; t_j (sn), ölçüm yapılan zamanı ve i_j (amper), geçen akımı ifade etmektedir.

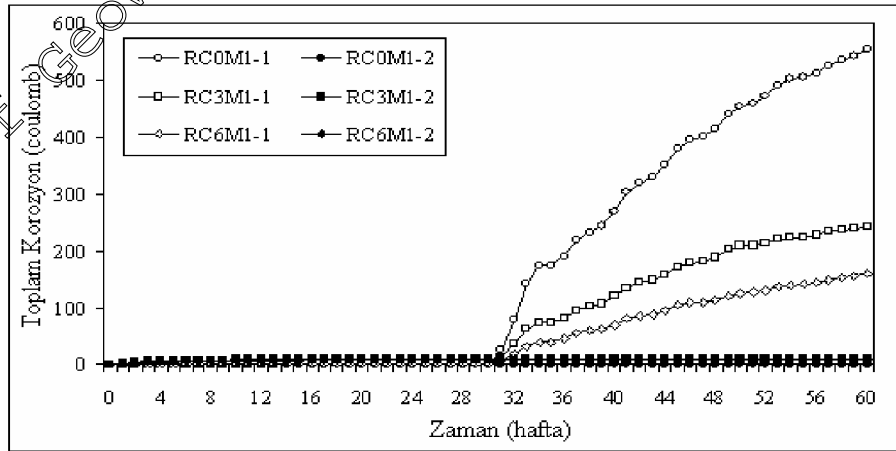


Şekil 4.48 Su ile çevrim uygulanan betonarme numunelerde toplam korozyon-zaman ilişkisi

Akım değerlerinden yararlanılarak standartta verilen bağıntı yardımı ile hesaplanan toplam korozyon (coulomb) değerlerinin zamanla değişiminin incelendiği Şekil 4.48-4.50’de toplam korozyonun tüm numunelerde zamanla arttığı görülmektedir. Hasar oluşturulması ile 30. haftada akım değerindeki artışa paralel olarak toplam korozyon da ani şekilde artış

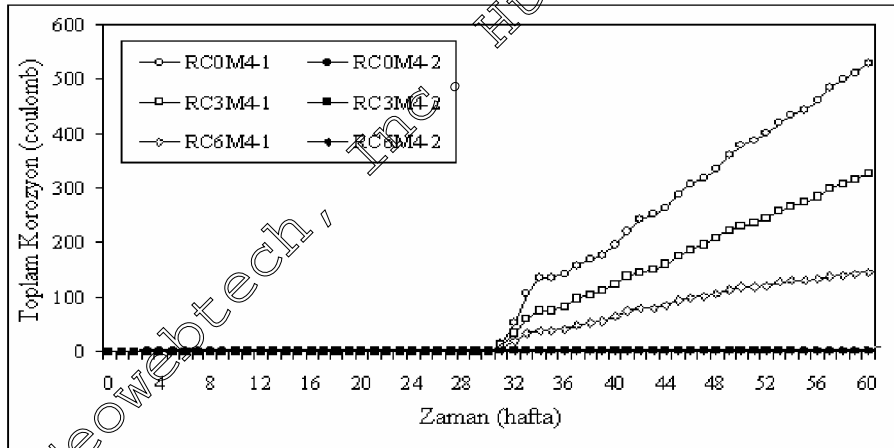
göstermiştir. Şekil 4.48-4.50'de görüldüğü gibi, su ve klorürlü çözeltiler ile ıslanma-kuruma çevrimi uygulanması durumunda en büyük toplam korozyon değeri, cüruf katkısız gruplarda meydana gelmiş, bunu %30 ve %60 cüruf katkılı gruplar RC3 ve RC6 grupları izlemiştir. Betondaki cüruf oranı arttıkça akımdaki azalmaya bağlı olarak toplam korozyon değeri de azalmıştır. Her üç etki (W, M1, M4) için en düşük toplam korozyon, RC6 grubunda meydana gelmiştir.

Su ile ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan yüksek fırın cürufu katkısız ve katkılı betonarme numunelerde anot ile katot arasında oluşan akımın kümülatif değerinden hesaplanan toplam korozyonun zaman ile değişiminin incelendiği Şekil 4.48'de görüleceği üzere toplam korozyon değeri, zamanla artmaktadır. 60. hafta sonunda cüruf katkısız RC0W-1 numunesinde 321 coulomb olan toplam korozyon değeri, hasarsız RC0W-2 numunesinde 1.45 coulomb değerindedir. Bu değer, %30 cüruf katkılı RC3W-1 numunesinde 172.74 coulomb, RC3W-2 numunesinde 10.16 coulomb iken %60 cüruf katkılı RC6W-1 numunesinde 118.70 coulomb, RC6W-2 numunesinde 4.81 coulomb değerindedir. Bu sonuçlardan da görüleceği üzere hasarlı numunelerde toplam korozyon, hasarsız numunelere göre çok yüksek değerlerde ve betonarme elemanlardaki hasarın korozyona etkisi açıkça görülmektedir. Betona cüruf katılması ve oranının artırılması ile toplam korozyon değerlerinde, cüruf katkısız numuneye kıyasla %30 cüruf katkılıda yaklaşık %46, %60 cüruf katkılıda ise %63 değerinde azalma olmuştur. Buradan beton üretiminde yüksek fırın cürufu kullanılmasının ve oranının artırılmasının anot ile katot arasındaki akımı, dolayısı ile toplam korozyonu %63'lere varan oranda azalttığı görülmüştür.



Şekil 4.49 M1 çözeltisi ile çevrim uygulanan betonarme numunelerde toplam korozyon-zaman ilişkisi

M1 çözültisi ile ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan yüksek fırın cürufu katkısız ve katkılı betonarme numunelerde anot ile katot arasında oluşan akımın kümülatif değerinden hesaplanan toplam korozyonun zaman ile değişiminin incelendiği Şekil 4.49'da da, su ile çevrim uygulanan numunelere benzerlik gösterdiği, toplam korozyon değerinin zamanla arttığı görülmektedir. 60. hafta sonunda cüruf katkısız RCOM1-1 numunesinde 553.30 coulomb olan toplam korozyon değeri hasarsız RCOM1-2 numunesinde 0.78 coulomb değerindedir. Bu değer, %30 cüruf katkılı hasarlı numunede 242.41 coulomb, hasarsız numunede 10.03 coulomb, %60 cüruf katkılı RC6M-1 numunesinde 161.48 coulomb, RC6M1-2 numunesinde 9.70 coulomb değerindedir. Bu sonuçlar, numunenin hasarlı veya hasarsız oluşuna, klorür konsantrasyonuna ve yüksek fırın cürufu oranına göre değerlendirildiğinde; toplam korozyon hasarlı numunelerde çok yüksek değerler almıştır. Ayrıca cüruf katılması ve oranının artırılması ile toplam korozyon değerlerinde cüruf katkısız numuneye kıyasla %30 cüruf katkılıda yaklaşık %56, %60 cüruf katkılıda ise yaklaşık %71 oranında azalma meydana gelmiştir.



Şekil 4.50 M4 çözültisi ile çevrim uygulanan betonarme numunelerde toplam korozyon-zaman ilişkisi

M4 çözültisi ile ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan yüksek fırın cürufu katkısız ve katkılı betonarme numunelerde de toplam korozyonun zaman ile değişiminin, su ve M1 çözültisi ile çevrim uygulanan numunelere benzerlik gösterdiği, toplam korozyon değerinin zamanla arttığı, cüruf kullanımı ve oranının artırılması ile azaldığı görülmektedir (Şekil 4.50). 60. hafta sonunda cüruf katkısız RCOM4-1 numunesinde 526.76 coulomb olan toplam korozyon değeri hasarsız RCOM4-2 numunesinde 2.94 coulomb değerindedir. Bu değer, %30 cüruf katkılı RC3M4-1 numunesinde 327.55 coulomb, RC3M4-2 numunesinde 3.62 coulomb, %60 cüruf katkılı RC6M-1 numunesinde 145.63 coulomb, RC6M4-2 numunesinde 2.15 coulomb

değerindedir. Bu sonuçlardan da görüleceği gibi hasarlı numunelerde toplam korozyon, hasarsız numunelere kıyasla yüksek değerler almıştır. Cüruf katılması ve oranının arttırılması ile toplam korozyon değerlerinde meydana gelen azalma, %30 cüruf katılıda yaklaşık %38, %60 cüruf katılıda ise yaklaşık %72 değerindedir. Buradan beton üretiminde yüksek fırın cürufu kullanılmasının ve oranının arttırılmasının anot ile katot arasındaki akımı azalttığı dolayısı ile toplam korozyonun %72'ye varan oranda azaldığı görülmektedir. Su ve M1 çözeltisi ile çevrim uygulananlara kıyasla M4 çözeltisinde çevrim uygulanan numunelerde betona cüruf katılmasının toplam korozyonu azalttığı, bu özelliğin yüksek cüruf içeriğinde daha etkili olduğu görülmektedir.

4.3.5 Donatılarda Korozyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Betonarme numunelerde 15 ıslanma-kuruma çevrimi uygulandıktan sonra çıkarılan donatılarda öncelikle çıplak gözle inceleme yapılmış, korozyon hasarı görülen donatılardaki hasarlı bölgelerin fotoğrafı Şekil Ek 9'da gösterilmiştir. Bu numunelerde ayrıca korozyon oluşan bölgenin boyu ölçülmüş, içinde yer aldığı betonun özelliklerine göre Şekil 4.51'de gösterilmiş, değerleri Çizelge Ek 7'de verilmiştir.

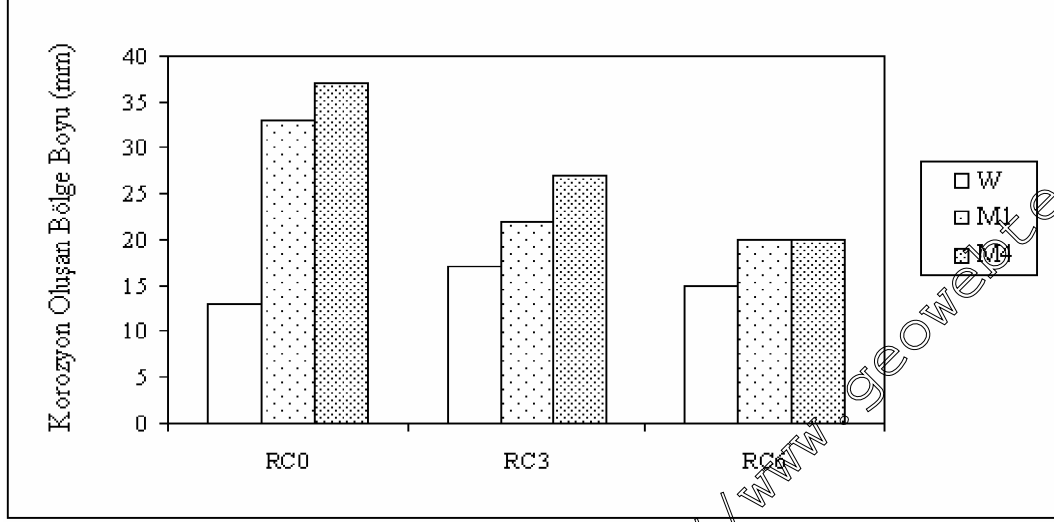
Korozyon Bölgesi İncelemesi

Betonarme numunelerden çıkarılan donatılarda Şekil 4.51'de görülen korozyon oluşan bölgenin boyu (l, mm) ölçülmüş, ortalama değeri, donatının içinde yer aldığı betonun özelliklerine göre (RC0, RC3, RC6) Şekil Ek 9'da görüldüğü gibi hasarlı betonarme numunelerden çıkarılan anot durumundaki donatıların hepsinde korozyon hasarı oluşmuştur.

Korozyon oluşan bölge boyunun cüruf oranına (RC0, RC3, RC6) ve eskitme sürecine (W, M1, M4) göre incelendiği Şekil 4.51 incelendiğinde, suda ıslanma çevrimi uygulanan cüruf katılı ve katısız numunelerden çıkarılan donatılarda korozyon oluşan bölge boyu M1 ve M4 çözeltilerine maruz olanlara kıyasla daha kısadır. Cüruf katılı ve katısız gruplarda korozyon oluşan bölge boyu, klorür konsantrasyonunun en yüksek olduğu M4 ortamında ıslanma-kuruma uygulanan numunelerden çıkarılan donatılarda en fazladır.

Cüruf katısız numunelerden çıkarılan donatılarda, klorür konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak korozyon oluşan bölge boyu da artmaktadır. %30 cüruf katılanlarda da cüruf katısızlara benzer bir durum vardır ancak korozyon oluşan bölge boyu, suda çevrim uygulanan numune hariç daha azdır. %60 cüruf katılanlardan çıkarılan donatılarda korozyon oluşan bölge boyu, diğer gruplardan daha kısadır ve M4 çözeltisindeki yüksek Cl

konsantrasyonuna rağmen, korozyon oluşan bölge boyu, RC0 ve RC3 gruplarınınkinden daha azdır; bu grupta (RC6) M1 ve M4 gibi farklı klorür konsantrasyonlarındaki etki aynıdır.



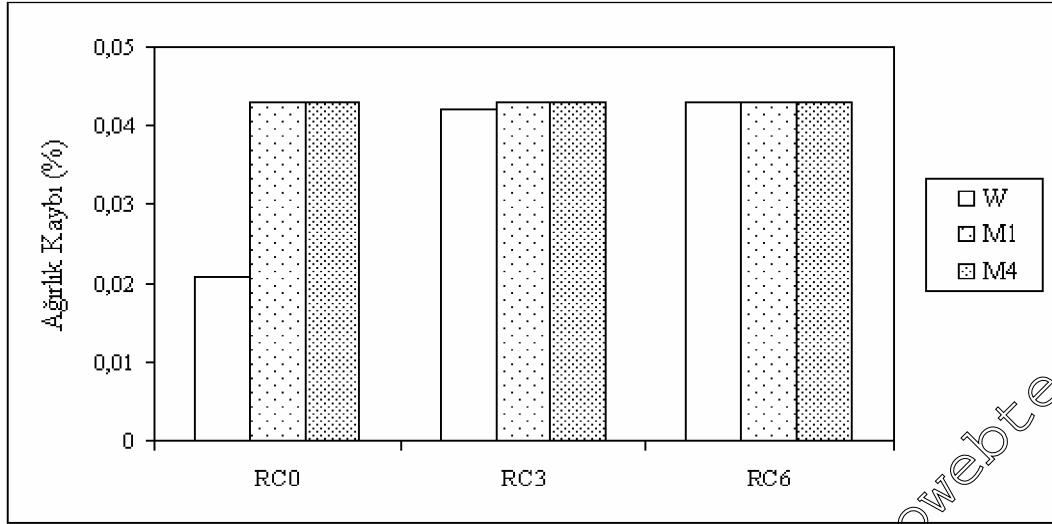
Şekil 4.51 Korozyon oluşan bölge boyunun YFC oranı ile değişimi

Ağırlık Kaybı Oranı

Hasarlı donatıların ağırlık kaybı oranı 40% bağıntısı yardımı ile hesaplanmış, değerleri Çizelge Ek 7’de verilmiştir. Bağıntıda W_k (%), ağırlık kaybı oranını, W_{son} (g) donatıların Clark çözeltisi ile temizlendikten sonraki ağırlığını, W_{ilk} (g) donatıların başlangıçtaki ağırlığını ifade etmektedir. Ağırlık kayıpları 40 cm boyundaki numunelerde belirlendiği için, kayıp oranı (%) çok küçük değerlerdedir. Ağırlık kaybının beton özelliğine göre değişimi Şekil 4.52’de verilmiştir.

$$\% W_k = \frac{W_{son} - W_{ilk}}{W_{ilk}} \quad (4.13)$$

Donatılarda korozyon nedeni ile meydana gelen ağırlık kayıplarının verildiği Şekil 4.52 incelendiğinde RC0 grubunun suda ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan serisi hariç diğer gruplarda birbirine çok yakın değerler aldığı görülmektedir. Ağırlık kayıplarının değerlendirilmesi ile numuneler arasında ciddi bir farklılık görülememektedir. Yukarıda da açıklanmaya çalışıldığı gibi, korozyon küçük bir bölgede olduğu halde ağırlık kaybı büyük numunelerde belirlenmiş, dolayısı ile kayıp oranı çok küçük değerde kalmış; değerler birbirine çok yaklaşmıştır. Bu nedenle korozyonun, bu çalışma için korozyon oluşan bölge boyu ile korozyonun değerlendirilmesi daha anlamlı olacaktır.



Şekil 4.52 Korozyon oluşan donatılarda ağırlık kaybının YFC oranı ile değişimi

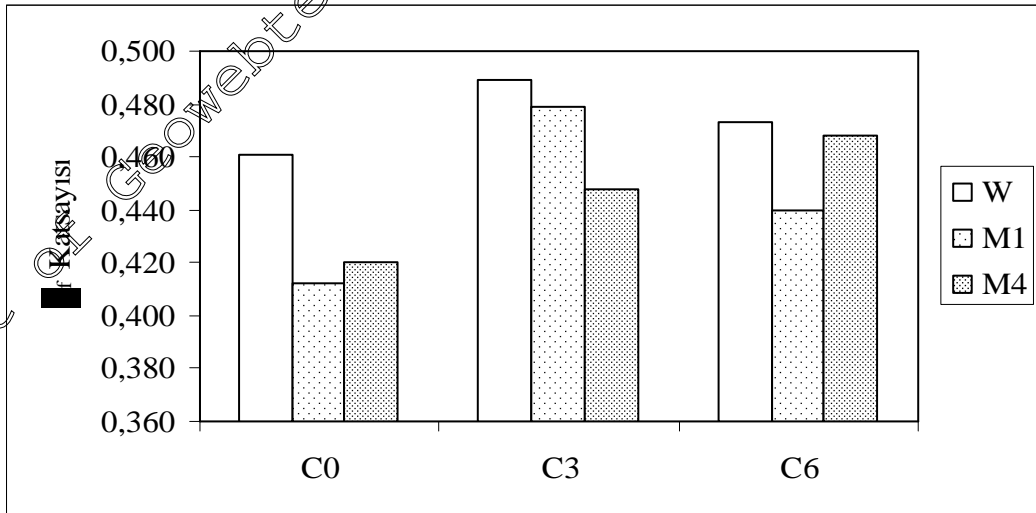
Copyright of Geowebtech, Inc. Http://www.geowebtech.com

5. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

Beton ve betonarmenin kalıcılığına yüksek fırın cürufunun ve ortam koşullarının etkilerini araştırmak amacı ile planlanan bu çalışmanın deneysel verilerinden elde edilen sonuçlar yarma dayanımı, yarı-hücre potansiyeli, toplam korozyon, betonun alkalitesi, hacimce su emme, korozyon aktivitesi bakımından irdelenmiş, sahada yapılacak ölçüm ve bilgilerden elde edilecek verilerin değerlendirilerek, sistemin korozyon durumunu belirlemeye olanak sağlayacak bağıntılar araştırılmıştır.

5.1 Yarma Dayanımı

Donatının korozyona uğraması ile meydana gelen hacim artışı, çekme dayanımı düşük olan betonun çatlamasına neden olur. Bu durum, betonarme yapıda donatıya paralel çatlakların oluşması ile görünür hale gelir. Korozyon hasarının gözlenmesinde çekme dayanımı çok önemli bir özellik olduğundan, bu çalışmada çekme dayanımı yarma deneyleri ile araştırılmış, yarma dayanımının cüruf katılması ile değişimi Bölüm 4'te etraflıca incelenmiştir. Bu bölümde ise, betonun yarma dayanımına cüruf oranının ve ıslanma-kurumanın etkisini araştırmak amacı ile yarma dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki, TS 500'de (2000) verilen 4.2 bağıntısı ile araştırılmış, 4.1 bağıntısındaki α_f katsayısının cüruf oranı ve ıslanma-kuruma etkisi ile değişimi; Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1 α_f katsayısının cüruf oranı ve çözelti konsantrasyonu ile değişimi

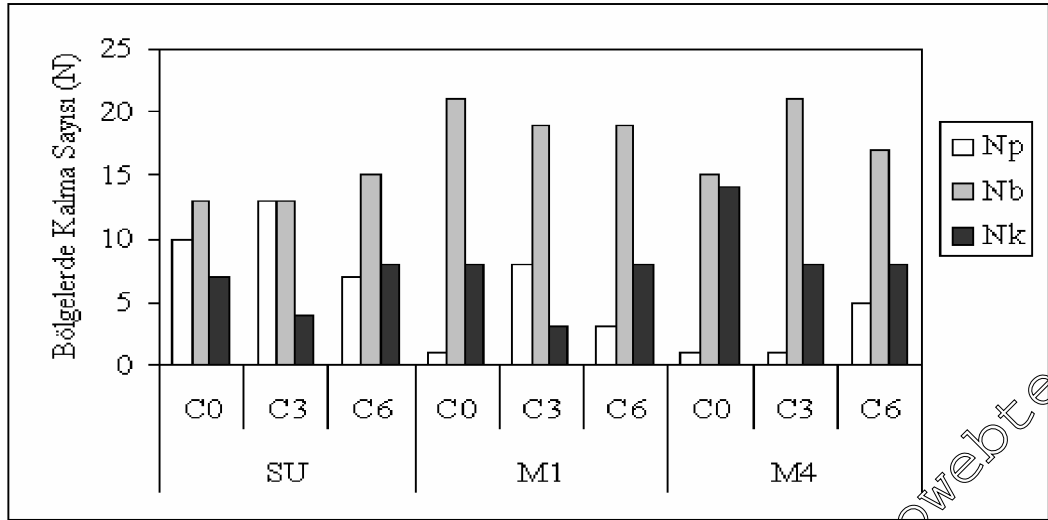
α_f katsayısı, Şekil 5.1'de görüldüğü gibi cüruf katılması ile artmış, klorür konsantrasyonunun artması ile azalmıştır. Su ve M1 çözeltisi ile ıslanma-kuruma etkisine maruz kalan gruplarda

%30 cüruf katılan C3 grubunun, yüksek klorür konsantrasyonu (M4) ile ıslanma-kuruma etkisine maruz kalan gruplarda ise %60 oranında cüruf katılan C6 grubunun daha dayanıklı olduğu görülmüştür. Bu özellik sayısal olarak değerlendirildiğinde; C0 grubunda 0.461 olan α_f katsayısının C3'de %6 artarak 0.489, C6'da %2.6 artarak 0.473 olduğu; cüruf katılması ile arttığı, özetle cürufun yarma dayanımını arttırdığı görülmüştür. C0 grubunun su etkisinde 0.461 olan α_f katsayısı, klorürlerin etkisinde, M1 serisinde %11 azalarak 0.412, M4 serisinde %9 azalarak 0.420 olmaktadır. Cüruf katılımlardan C3 grubunun su etkisinde 0.489 olan katsayı, M1 etkisinde %2 azalarak 0.479, M4 etkisinde %8 azalarak 0.448 olmaktadır. C6 grubunun su etkisinde 0.473 olan katsayı, M1'de %7 azalarak 0.440, M4'de %1 azalarak 0.468 olmaktadır. Buradan cürufun, betonun çekme dayanımını arttırdığı, yüksek konsantrasyonlu klorür çözeltilerinin etkisinde donatı korozyonunu geciktirdiği, tüm verilerin özetlendiği Çizelge 5.2'de de görülmektedir.

5.2 Yarı-Hücre Potansiyeli

Yarı-hücre potansiyeline göre korozyonun sayısal değerlendirilmesinin gösterildiği Şekil 5.2'deki pasif bölgede kalma sayısı (N_p), belirsizlik bölgesinde kalma sayısı (N_b) ve korozyon bölgesinde kalma sayısının (N_k) değerleri incelendiğinde; su ve klorürlü çözeltiler ile ıslanma-kuruma sürecinde cüruf katısız numunelerin pasif bölgede kalma sayısı (N_p) toplam 12 iken, bu sayı %30 ve %60 cüruf katılımlı numunelerde sırası ile 22 ve 15'dir ve cüruf katılımların pasif bölgede kalma sayısı cüruf katısızdan daha çoktur. Belirsizlik bölgesinde kalma sayısı (N_b) bakımından incelendiğinde, cüruf katısız numunelerde 49 olan bu sayı, %30 cüruf katılımlarda 52, %60 cüruf katılımlarda 51'dir. Bu bölge için cüruf katılmasının bölgede kalma sayısı bakımından farklılık belirgin değildir. Korozyon bölgesinde kalma sayısı (N_k) bakımından incelendiğinde, cüruf katısızlarda 29 olan sayının, %30 ve %60 oranlarında cüruf kullanılmasıyla sırası ile 15 ve 24'e düştüğü görülmüştür.

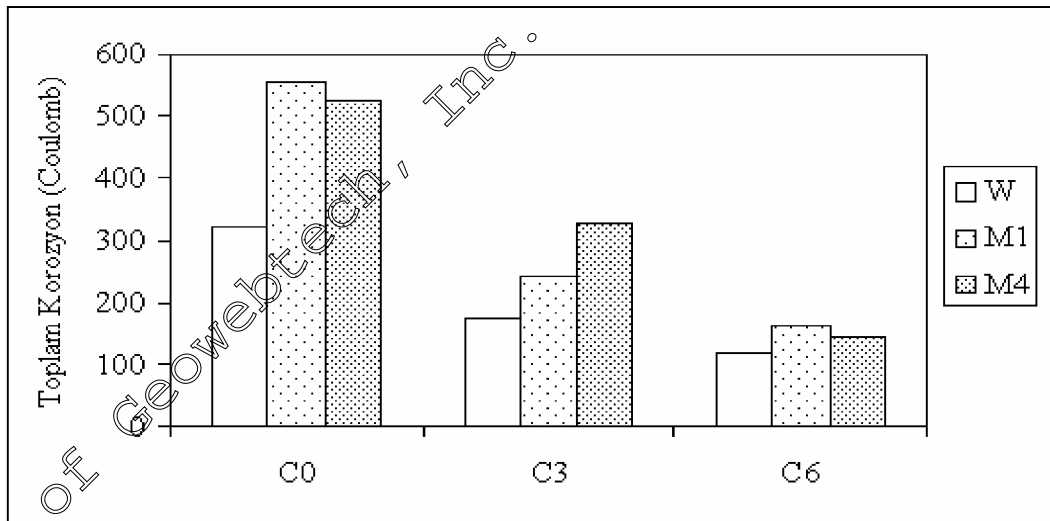
Korozyon bölgesinde kalma sayıları bakımından, Şekil 5.2'de görüldüğü gibi %50'ye varan, cürufun korozyonu azaltma etkisi açıkça görülmektedir. Su ve M1 etkisinde %30 cüruf katılmasının korozyona etkisinin daha belirgin olduğu, yüksek klorür konsantrasyonu etkisinde (M4), %30 ve %60 cüruf katılmasının etkisinin hemen hemen aynı olduğu görülmektedir.



Şekil 5.2 Korozyon bölgelerinde kalma sayıları

5.3 Toplam Korozyon

Hasarlı betonarme numunelerde 60. haftadaki toplam korozyon değerlerinin gösterildiği Şekil 5.3 incelendiğinde; betona cüruf katılması ve oranının artırılması ile toplam korozyon değerleri(coulomb), ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan her etkide azalmaktadır.



Şekil 5.3 Hasarlı betonarme numunelerde 60. haftadaki toplam korozyon değerleri

Su etkisinde cüruf katısız numunede 321 coulomb olan değer, %30 cüruf katılıda 172.74 coulomb değerine, %60 cüruf katılıda 118.70 coulomb değerine düşmüştür. Suyun etkisinde toplam korozyondaki azalma, %30 cüruf etkisinde %46 iken %60 cüruf etkisinde %63'dür. M1 etkisinde cüruf katısız numunede 553.30 coulomb olan değer, %30 cüruf katılıda 242.41 coulomb'a, %60 cüruf katılıda 161.48 coulomb değerine düşmektedir. M1 etkisinde toplam korozyondaki azalma, %30 cüruf etkisinde yaklaşık %56 iken %60 cüruf etkisinde %71'dir. M4 etkisinde cüruf katısızda 526.76 coulomb olan değer, %30 cüruf katılıda

327.55 coulomb, %60 cüruf katkılıda 145.63 coulomb değerine düşmüştür. M4 etkisinde toplam korozyondaki azalma, %30 cüruf etkisinde yaklaşık %38 iken %60 cüruf etkisinde %72'dir. Kısaca özetlenen bu verilerden, yüksek fırın cürufunun olumlu etkisi, yüksek konsantrasyonlu çözeltilerin etkisinde daha belirgindir.

5.4 Betonun Alkalinitesi

Beton örtü tabakasından alınan toz numunede ölçülen pH değerinin zaman ile değişiminin gösterildiği Şekil 2.6 incelendiğinde, betonun üretildiği ilk anda ve üretimi takiben kısa bir süre içinde pH değeri, 12.6 mertebelerindedir ve alkali koruyucu etki yaparak donatıyı korozyona karşı korumaktadır. Ancak pH'ın 9.5 değerinin altına inmesi ile bu alkali koruyucu etki sona ermekte, 8.3 değerine düşmesi ile donatının elektrolitik korozyonu başlamaktadır. Betonun pH değeri, karbonatlaşma, klorür iyonlarının varlığı ve puzolan malzeme kullanılması ile düşmektedir. Betonun alkalinitesine (pH) etkileden faktörler, bu çalışmada elde edilen deney sonuçlarından yararlanılarak irdelenmiştir.

5.4.1 Alkaliniteye Yüksek Fırın Cürufunun Etkisi

Çizelge 5.2'den de görüleceği üzere betonda yerdeğıştirmeli olarak yüksek fırın cürufu kullanılması, diğer puzolanlarda da olduğu gibi serbest kirecin bağlanması nedeni ile pH değerlerinde düşüşe neden olmuştur. Cüruf katkısız betonların suda ıslanma-kuruma çevrimi uygulananlarında 12. çevrim sonunda 20-30 mm'lik bölgesinden alınan toz numunelerdeki pH değeri, cüruf katkısızlarda 11.8 iken, %30 cüruf katkılılarda (C3W) 11.1 değerine, %60 cüruf katkılılarda ise 11.0 değerine düşmüştür. Bu verilerden, betonda yerdeğıştirmeli olarak yüksek fırın cürufunun kullanılması ve oranının artırılmasının betonun pH değerini düşürdüğü, bu düşüşte puzolanik etkiden başka yüksek fırın cürufunun içinde bulunan %1.64 oranındaki kükürtün de etkili olduğu söylenebilir. Bu nedendir ki ASTM C989'da (2005), beton veya harç üretiminde katkı maddesi olarak kullanılacak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunda kükürt (S) oranı maksimum %2.5 ile sınırlandırılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufunda bulunan kükürt oranı bu değerin çok altında kalmasına rağmen, pH değerinde önemli düşüşe neden olmuştur. Alkalinitenin düşmesi, korozyonu hızlandıran önemli bir faktör olduğundan, kükürt oranına sınırlandırma getirilmesinin korozyon açısından önemi açıkça görülmektedir. Aynı standartta SO₃ için de maksimum %4.5 değerine işaret edilmektedir. İlgili standartta, granüle yüksek fırın cürufundaki kükürtün, çoğunlukla sülfite olarak bulunduğu, yapılan çalışmalarda X-ray fluorescence analizlerinde kükürtün (sülfite olarak) sülfattan ayrılamadığı ancak raporlarda kükürtün (sülfite olarak) içeriğinin ayrı olarak

belirtilmesi gerektiği ve SO_3 hesaplamalarında dikkate alınmayacağı belirtilmiştir (ASTM C989, 2005).

5.4.2 Alkaliniteye Klorür Etkisi

Betonarme yapılarda klorürlerin yapıyı dışarıdan veya herhangi bir nedenle betona karışması ile içerden etki etmesi durumunda korozyonu hızlandırdığı için klorürlere Çizelge 5.1'de görüldüğü gibi sınırlama getirilmiş ve klorürlerin donatı korozyonuna etkisi, korozyon aktivite seviyesi olarak belirtilmiştir (Soleymani ve Ismail, 2004). Bu etkileri incelemek amacı ile tezin deneysel bölümünde, eskitme sürecinde kullanılan klorür konsantrasyonunun pH değerine etkisi incelenmiştir. Buna göre, pH'ın su ile ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan cüruf katkısız (C0W) numunelerde 11.8, klorür iyon konsantrasyonu 10.000 mg/l olan cüruf katkısız (C0M1) numunelerde 11.6 ve C0M4 grubu numunelerde 11.5 değerinde olduğu görülmektedir. Buna göre, cüruf katkısız numunelerde eskitme sürecinde kullanılan klorür iyonlarının konsantrasyonu arttıkça pH değerlerinde azalma görülmektedir. Ancak bu azalma, cüruf katılmasının neden olduğu azalmadan daha düşük değerdedir; örneğin cüruf katılması ile pH değerinde meydana gelen azalma, en yüksek cüruf içeriğinde yaklaşık %7 iken, en yüksek klorür konsantrasyonunu etkisinde %2.5 değerindedir. Buradan, betona katılan puzolan malzemelerin alkaliniteye etkisi açıkça görülmektedir. Bu nedenle, betonun alkalinitesinin donatı korozyonuna etkisi pek çok çalışmada etraflıca araştırılmaktadır.

Çizelge 5.1 Korozyon aktivite değerlendirme sistemi (Soleymani ve Ismail, 2004)

| Çimento Ağırlığının %'si olarak Klorür içeriğinin Eşik Değeri | Korozyon Durumu | Korozyon Aktivite Seviyesi |
|---|-----------------------------|----------------------------|
| $Cl < \% 0.3$ | Düşük korozyon durumu | A |
| $\% 0.3 \leq Cl < \% 1.0$ | Orta derece korozyon durumu | B |
| $Cl \geq \% 1.0$ | Yüksek korozyon durumu | C |

Çizelge 5.2'de verilen deney sonuçları, korozyon aktivite değerlendirme sistemine göre (Çizelge 5.1) değerlendirildiğinde, paspayı bölgesini temsilen 20-30 mm'lik bölgeden çıkarılan toz numunelerde, en yüksek klorür konsantrasyonu etkisinde, cüruf katılmamış grupta çimento ağırlığınca %1 oranında serbest klorür bulunurken, %30 cüruf katılması ile bu oran %0.260'a, %60 cüruf katılması ile %0.153 değerine düşmektedir. Başka bir deyişle, %30 oranında cürufun çimento ile yer değiştirilmesi ile serbest klorür miktarı çimento ağırlığınca

%74, %60 oranında cürufun çimento ile yerdeğiştirilmesi ile yaklaşık %85 azalmıştır. Cüruf, klorür difüzyonunu azaltmıştır.

Cüruf katılmamış gruptaki klorür oranı, %1 ile yüksek korozyon durumunu (C) işaret ederken, cüruf katkılı gruplarda su ve M1 etkisinde düşük korozyon durumunu (A), yüksek klorür etkisinde bile %0.3'ten büyük değerler ile orta derecede korozyon durumunu (B) işaret etmektedir (Soleymani ve Ismail, 2004). Buradan beton üretiminde kullanılan yüksek fırın cürufunun etkisi açıkça görülmektedir.

5.5 Hacimce Su Emme

Bu çalışmadaki deney sonuçlarının özetlendiği Çizelge 5.2'de verilen hacimce su emme değerleri incelendiğinde, suda ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan cüruf katkısız numunelerde (C0W) hacimce su emme oranının %7.4 olduğu, %30 ve %60 oranında yüksek fırın cürufu kullanılması ile bu oranın sırası ile %6.2 ve %5.3 değerine düştüğü görülmektedir. Cüruf etkisi ile hacimce su emmedeki azalma, sırası ile %16.2 ve %28'dir. Aynı zamanda, cüruf katkısız numunelerin su ve klorür konsantrasyonları etkisinde hacimce su emme oranındaki değişimler incelendiğinde, su etkisinde %7.4 olan değer M1 etkisinde yaklaşık %14 azalarak %6.2'ye, M4 etkisinde %7 azalarak %6.9 değerine düştüğü görülmektedir. Bu sonuçlar, eskitme sürecinde kullanılan $MgCl_2$ tuzunun brüsit oluşturmak sureti ile yüzeyi tıkadığı görüşünü doğrulamaktadır. Bilindiği üzere, yapıyı etkileyen yeraltı sularında bulunan magnezyum klorür ($MgCl_2$), sertleşmiş çimento hamurundaki kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek 2.2 bağınisında görüldüğü gibi çözünen $CaCl_2$ ve çözünmeyen $Mg(OH)_2$ (brüsit) meydana getirir (Baradan vd., 2002). Suda erimeyen bu madde, beton yüzeyini örter ve zararlı suların beton içine nüfuz etmesini önler. Ancak bu durum bir süre sonra değişir, çünkü bir süre sonra brüsit, silis jeli ile birleşerek magnezyum silikata dönüşür ve bu MSH jelinin bağlayıcılık özelliği yoktur (Akman, 1992; Baradan vd., 2002). Cüruf katkısız ve cüruf katkılı gruplarda klorürlü çözeltilerin brüsit oluşumuna etkisi incelendiğinde ise; C0 numunelerinin klorür etkisinde hacimce su emme oranındaki azalma belirgin iken C3 ve C6 gruplarında dikkate değer bir değişim görülmemektedir. Bu durum, cüruf içermeyen numunelerdeki $Ca(OH)_2$ miktarının cüruf içeren numunelerdekinden daha fazla olması ve fazla olan $Ca(OH)_2$ 'in $MgCl_2$ ile reaksiyona girerek daha fazla brüsit oluşumuna bağlı olarak boşlukları tıkadığı şeklinde yorumlanabilir.

Bu çalışmadan elde edilen ve altı ayrı başlık altında irdelenen deney sonuçları Çizelge 5.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 5.2 Deney sonuçlarının korozyon aktivite seviyesi bakımından değerlendirilmesi

| Numune Kodu | 20-30 mm bölgesinden alınan toz numunelerde | | | | Karbonatlaşma d_c (mm) | Hacimce Su Emme Oranı % h_s | Toplam Korozyon (coulomb) | α_f |
|-------------|---|--|----------------------------|------|--------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------|
| | Cl ⁻ Konsantrasyonu (mg/L) | Çimento Ağırlığına Göre Cl ⁻ Konsantrasyonu (%) | Korozyon Aktivite Seviyesi | pH | | | | |
| C0W | 10 | 0.032 | A | 11.8 | - | 7.4 | 321.00 | 0.461 |
| C0M1 | 219 | 0.730 | B | 11.6 | - | 6.4 | 553.30 | 0.412 |
| C0M4 | 301 | 1.000 | C | 11.5 | - | 6.9 | 526.76 | 0.420 |
| C3W | 21 | 0.069 | A | 11.1 | 1.0 | 6.2 | 172.74 | 0.489 |
| C3M1 | 18 | 0.059 | | 11.3 | 1.0 | 6.5 | 242.41 | 0.479 |
| C3M4 | 80 | 0.260 | | 11.2 | 0.5 | 6.2 | 327.55 | 0.448 |
| C6W | 19 | 0.062 | A | 11.0 | 3.5 | 5.3 | 118.70 | 0.473 |
| C6M1 | 24 | 0.079 | | 11.2 | 1.5 | 5.4 | 161.48 | 0.440 |
| C6M4 | 47 | 0.153 | | 11.1 | 0.5 | 5.4 | 145.63 | 0.468 |

5.6 Korozyon Aktivitesinin Belirlenmesi

Beton ve betonarme numunelere uygulanan uzun süreli dürabilite deney sonuçlarından, betonarme elemanlarda, yerinde yapılacak ölçüm ve deneylerden yararlanılarak elemanın korozyon aktivitesinin ve korozyon durumunun tahminine yönelik aşağıdaki bağıntılar geliştirilmiştir.

a) Bu çalışmadaki deney sonuçlarına bağlı olarak betonun yaşına (t, gün), toz numunenin alındığı derinliğe (d_c , mm), kullanılan yüksek fırın cürufu oranına (YFC, %), betonun porozitesini temsil eden hacimce su emme oranına (h_s , %) ve betona dışarıdan etki eden çözeltinin klorür konsantrasyonuna (M, mg/L) bağlı olarak her bir özellik için 90 adet ölçüm ve deney sonucundan yararlanılarak beton içine nüfuz eden serbest klorürün konsantrasyonunun (Cl⁻) mg/L olarak belirlenmesine olanak sağlayacak 5.1 bağıntısı elde edilmiştir.

$$Cl^- = 44.87 - 10.984d + 0.845t - 134.77YFC + 0.002M + 2713.17h_s \quad R=0.793 \quad (5.1)$$

Bağıntı (5.1) incelendiğinde, betondaki serbest klorür iyon konsantrasyonunun numune alınan derinliğin ve beton üretiminde kullanılan cüruf oranının artması ile azaldığı; eskitme sürecinde kullanılan klorürlü çözeltilerin konsantrasyonundaki ve hacimce su emme

oranındaki artış ile arttığı görülmektedir. Bu durum beklendiği gibi olayın mekanizmasını açıklar niteliktedir.

Bu bağıntıdan yararlanılarak, belirlenecek serbest klorürün elemanda neden olacağı akımın (i , μA) belirlenmesine ve akımın kritik değeri ile karşılaştırılmasına olanak sağlayacak 5.2 bağıntısı elde edilmesi için hasarlı betonarme numunelerde, 60. hafta sonundaki akım değerleri ile serbest klorür konsantrasyonu arasında ($n=9$) ilişki araştırılmış, korelasyon katsayısı yüksek 5.2 bağıntısı elde edilmiştir.

$$i=8.841+0.0734\text{Cl}^- \quad R=0.90 \quad (5.2)$$

Bağıntıda i , μA olarak akımı; Cl^- , mg/l olarak serbest klorür konsantrasyonunu ifade etmektedir. Buna göre; betondaki serbest klorür iyonu arttıkça sistemden geçen akım (i , μA) artmakta, anot ile katot arasındaki akımın artışı ile korozyon hızlanmaktadır. Bu bağıntılardan (5.1 ve 5.2) yararlanılarak hesaplanacak akımın (i , μA), sistem için kritik değer olarak verilen $10 \mu\text{A}$ ile karşılaştırılmasından, betonarme elemanın korozyon durumu tahmin edilebilecektir.

Cürufli çimento kullanılarak veya çimentoya cüruf katılarak üretilmiş beton ile inşa edilmiş yapının yaşı, kullanılan betondaki cüruf oranı ve dış ortamın klorür konsantrasyonunun bilinmesi halinde yapıda örtü betonu kalınlığının ölçülmesi ve yapıdan alınacak beton örneklerinde hacimce su emmenin belirlenmesi ile betondaki serbest klorür konsantrasyonu ve $100 \Omega'$ luk direnç için akım değeri tahmin edilebilecek, elemanın korozyon durumu hakkında fikir sahibi olunabilecektir.

b) Deney sonuçlarından yararlanılarak ayrıca, hasarlı betonarme numunelerde $100 \Omega'$ luk direnç için 270 adet ölçümden makro-hücre potansiyeli (E_m) ve yarı-hücre potansiyeli (E_y) arasında 5.3'te verilen ilişki elde edilmiştir. Bu bağıntıdan yararlanılarak sahada uygulanması daha kolay ve pratik olan yarı-hücre potansiyeli ölçümlerinden makro-hücre potansiyeli belirlenebilecektir. Makro-hücre potansiyelinden hesaplanacak akım değerlerinden korozyonun durumu hakkında fikir sahibi olunabilecektir.

$$E_{m(W,M1,M4)}=0.0123-0.00742E_{y(W,M1,M4)} \quad R=0.36 \quad (5.3)$$

Bağıntıda E_m , mV olarak $100 \Omega'$ luk direnç için belirlenen makro-hücre potansiyel değerini; E_y , mV olarak yarı-hücre potansiyel değerini ifade etmektedir. Buna göre; yarı-hücre potansiyelinin aldığı negatif değerler arttıkça, makro-hücre potansiyeli de artmaktadır. Bilinen ve/veya belirlenecek beton özelliklerine bağlı olarak ve betonarme numunelerdeki ölçüm değerleri kullanılarak 5.2 ve 5.3 bağıntılarından donatılardaki $100 \Omega'$ luk dirençten geçen

akımın tahmin edilebileceği ve kritik akım değeri ile karşılaştırılabileceği kanısına varılmıştır. Bu çalışmadaki deney ve ölçüm yöntemleri farklı imento dozajı, farklı örtü betonu kalınlığı, farklı yüksek fırın cürufu oranları, farklı klorür konsantrasyonları ve farklı ıslanma-kuruma çevrim sayıları için tekrarlanmalı, elde edilmiş olan bağıntuların güvenirliği ve arazide uygulanabilirliği test edilmelidir.

Copyright of Geowebtech, Inc. Http://www.geowebtech.com

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Beton üretiminde yüksek fırın cürufu kullanılmasının beton ve betonarmenin kalıcılığına etkisinin araştırıldığı bu çalışmada, su ve klorür konsantrasyonu farklı çözeltiler ile ıslanma-kuruma çevrimi uygulanarak uzun süreli kalıcılık deneyleri yapılmış, çalışmadan elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda özetlenmiştir.

1. Su ve yüksek konsantrasyonlu çözeltiler ile ıslanma-kuruma etkisine maruz olmasına rağmen öğütülmüş yüksek fırın cürufu katkılı ve katkısız tüm betonların basınç ve yarma dayanımı zamanla artmıştır. Bu durum, iyi işçilik ile üretilmiş betonun çevresel etkilere karşı dayanıklı olduğunun açık bir göstergesidir.
2. Hasarsız numunelerdeki potansiyel ölçümlerinden, hesaplanan akım değerlerinden ve gözlemlerden, iyi işçilik ile üretilmiş betonun, yüksek klorür çözeltileri ile uygulanan ıslanma-kuruma etkisinde bile donatıyı korozyondan koruduğu görülmüştür. Betonarmede örtü betonunda herhangi bir nedenle çatlak veya hasar oluşması, korozyonun başlamasına ve hızlanmasına neden olmuştur. Bu nedenle betonarmede örtü betonunun geçirimsizliği, sürekliliği ve bakımı çok önemlidir.
3. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu katılması ile betonun geçirimsizliği azalmıştır. Geçirimsiz olmasına rağmen, yüksek fırın cürufunun puzolanik etkisi nedeni ile betonun karbonatlaşma derinliği artmış, alkalinitesi düşmüştür. Yüksek fırın cürufu, alkaliniteyi düşürmesine rağmen, hasarlı numunelerde bile korozyon etkisini azaltmıştır. Ancak, demir-çelik endüstrisindeki üretim prosesine bağlı olarak yüksek fırın cürufunun içinde bulunan kükürtün (S), organik kükürt içeren molekül bileşiklerinin donatı üzerinde adsorblanarak demiri ayrıştırma ve asidik ortamda H₂S çıkarma özelliği bulunduğu ve bunun da donatı korozyonunu hızlandırması açısından önemli olduğu dikkate alınmalıdır.
4. Betona öğütülmüş yüksek fırın cürufu katılması klorür iyonlarının beton içinde ilerlemesini, derine doğru nüfuz etmesini azaltmıştır. Cürufun bu etkisi, yüzeye yakın bölgelerde belirgin değildir, derinlik arttıkça daha belirgin hale gelmiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda, yüksek fırın cürufu katkılı betonların havada kür edilseler bile klorür difüzyonunu azaltmada çok etkili olduğu, puzolanik reaksiyonun kuru ortamda bile devam ettiği, çimento pastası-agrega arayüz geçiş bölgesinin daha yoğun olmasını sağladığı ifade edilmektedir.

5. Donatı korozyonunun izlenmesi için yapılan ölçümlerde; yarı-hücre potansiyeli ölçümlerinin tek başına yeterli olmadığı, makro-hücre potansiyelinin de belirlenmesinin ve iki ölçüm sonucunun birlikte değerlendirilmesinin daha güvenilir olacağı görülmüştür. Daha önceden yapılmış çalışmalarda da, bu durumun göz önünde bulundurulması gerektiği ifade edilmektedir. Arazide betonarme yapıdaki korozyon ile ilgili inceleme, tespit ve ölçümlerde, pratik olması nedeni ile yarı-hücre potansiyeli ölçümlerine dayanılarak korozyon ile ilgili yorum yapılmaktadır. Bu sakıncanın giderilmesine katkıda bulunmak amacı ile bu deneysel çalışmada, yarı-hücre potansiyeli ile makro-hücre potansiyeli arasındaki ilişki araştırılmış, korelasyonu yüksek olmasa da bir bağıntı elde edilmiştir. Bağıntıdan hesaplanan makro-hücre potansiyelinden 100 Ω ' luk dirençteki sistemin akım değerinin hesaplanması ve kritik değer ile karşılaştırılmasından elemandaki korozyon oluşumu ve/veya gelişimi hakkında fikir edinilebileceği kanaatine varılmıştır.
6. Bu çalışmadaki ölçüm yöntemleri ve deneyler farklı çimento dozajı, farklı yüksek fırın cürufu oranları, farklı örtü betonu kalınlığı, farklı klorür konsantrasyonları ve farklı ıslanma-kuruma çevrim sayıları için tekrarlanmalı, bağıntıların güvenilirliği ve arazide uygulanabilirliği test edilmelidir.
7. Korozyon oluşumu, maliyet unsuru göz önünde bulundurularak farklı incelikte öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, farklı klorür tuzu, farklı örtü betonu kalınlığı için benzer yöntem ile araştırılmalı, uygun cüruf oranı belirlenmelidir.
8. Betonarme numunelerde donatıların yüzeyleri, yüzey koruyucu malzemelerle kaplanarak bu malzemelerin donatı korozyonunu önlemede ve/veya geciktirmedeki etkinlikleri araştırılmalıdır.
9. Korozyon oluşumunda etkili olan serbest klorür dikkate alınarak, beton içerisine nüfuz eden toplam klorür ve Fick Yasası yardımı ile klorür difüzyon katsayıları belirlenmeli, betonda toplam klorür ve serbest klorür arasında ilişki kurularak korozyon oluşumunda klorürlerin etkisi ile ilgili değerlendirme yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

AASHTO T260, (1997), Standard Method of Test for Sampling and Testing for Chloride Ion in Concrete and Concrete Raw Materials, AASHTO, USA.

ACI 226.1R-87, Ground Granulated Blast Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete, Reported by ACI Committee 266, American Concrete Institute, Detroit, Michigan.

ACI 363R-92, State-of-the-Art Report on High-strength Concrete, Reported by ACI Committee 363, American Concrete Institute, Detroit, Michigan.

ACI 222R-96, Corrosion of Metals in Concrete, American Concrete Institute, Detroit, Michigan.

ACI 318-99, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, American Concrete Institute, Detroit, Michigan.

ACI 222R-01, Protection of Metals in Concrete Against Corrosion, American Concrete Institute, Detroit, Michigan.

Ahmad, S., (2003), "Reinforcement Corrosion in Concrete Structures, Its Monitoring and Service Life Prediction-A Review", Cement and Concrete Composites 25: 459-471.

Aka, İ, Keskinel, F. ve Arda, T. S., (1996), Betonarme Yapı Elemanları, 8. Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Akman, M. S., (1987), Yapı Malzemeleri, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

Akman, M. S., (1989), "Beton'da Dayanıklılık Özelliği ve Önemi", TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 1. Ulusal Beton Kongresi, 24-25-26 Mayıs 1989, İstanbul, 53-66.

Akman, M. S., (1992), Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi, İTÜ Matbaası, İstanbul.

Akman, M. S., (2002), "Effects of the Content and Kind of Soluble Alkalis in Cements on Different Properties of Concrete", Cement and Concrete World, December-November 2002, 7: 35-52.

Aköz, F., Türker, F., Koral, S. ve Yüzer N., (1995), "Effects of Sodium Sulfate Concentration On The Sulfate Resistance of Mortars With and Without Silica Fume", Cement and Concrete Research, 25: 1360-1368.

Aköz, F., Yüzer, N. ve Koral, S., (1996a), "Silis Dumanı Katkılı ve Katkısız Harç İçindeki Çeliğe Farklı Konsantrasyonlardaki Magnezyum Klorürün Etkisi", TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 4. Ulusal Beton Kongresi, 30-31 Ekim-1 Kasım 1996, 317-326, İstanbul.

Aköz, F., Yüzer, N. ve Koral, S., (1996b), "Silis Dumanı Katkılı ve Katkısız Harçlara Sodyum Klorür ve Magnezyum Klorürün Etkileri", 4. Ulusal Beton Kongresi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 305-316.

Aköz, F., Zorbozan, M. ve Yüzer, N., (2000), “Betonarme Yapılarda Korozyon Hasarının Tespiti, Onarımı için Öneriler”, Metal Dünyası Dergisi, Ekim 2000, Sayı 89, yıl 9, 25-28.

Aköz, F., (2005), “Suyun Yapılara Zararlı Etkileri ve Yalıtımı” Tesisat, Enerji Teknolojileri ve Mekanik Tesisat Dergisi, Sayı 111, 150-160.

Al-Amoudi, O. S., Rasheeduzzafar, S.N. ve Maslehuddin, A. M., (1992), “Effect of Chloride-Sulfate Ions on Reinforcement Corrosion and Sulfate Deterioration in Blended Cements” Fourth Canmet/ACI, Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Vol 2, 1105-1123.

Almusallam, A. A., (2001), “Effect of Degree of Corrosion On The Properties of Reinforcing Steel Bars”, Construction and Building Materials 15:361-368.

Andrade, C., Alonso, C. ve Molina, F. J., (1993), “Cover Cracking as a Function of Bar Rebar Corrosion: Part I-Experimental Test”, Materials and Structures, 26:453-464.

Andrade, C., Diez, J. M. ve Alonso, C., (1997), “Mathematical Modelling of a Concrete Surface Skin effect on Diffusion in Chloride Contaminated Media”, Advanced Cement Based Materials 6:39-44.

Andrade, C. ve Martinez, I., (2003), “Advances in the Corrosion Rate Monitoring in Real Structures”, 5. Ulusal Beton Kongresi, 1-2-3 Ekim 2003, İstanbul, 215-226.

Arioğlu, E., (1989), “Prefabrikasyon Endüstrisinde Beton Kalitesinin ve Denetiminin Mevcut Durumu”, 1. Ulusal Beton Kongresi, 24-25-26 Mayıs 1989, İstanbul, 199-208.

Arioğlu, E., (1996), “Betonun Çekme ve Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki”, Teknik Dergi, 7 (1): 1153-1157.

ASTM C 876-91, American Society for Testing and Materials, Standart Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.

ASTM G 109-92, American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Determining the Effects of Chemical Admixtures on the Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments.

ASTM C 597-02, American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.

ASTM C989-05, Standart Specification for Ground Granulated Blast Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars.

Atahan, N., Pekmezci, B., Uyan, M. ve Yıldırım, H., (2003), “Sülfatların Portland Çimentolu ve Sülfata Dayanıklı Çimentolu Betonların Dürabilitesine Etkisi”, 5. Ulusal Beton Kongresi, 1-2-3 Ekim 2003, İstanbul, 411-419.

Bagel, L., (1998), “Strength and Pore Structure of Ternary Blended Cement Mortars Containing Blast Furnace Slag and Silica Fume”, Cement and Concrete Research, 28: 1011-1020.

Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H., (2002), Betonarme Yapılarda Kalıcılık, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, Yayın No:298, ISBN: 975-441-189-1, İzmir.

Bleszynski, R., (2002), "The Performance and Durability of Concrete With Ternary Blends of Silica Fume and Blends of Silica Fume and Blast Furnace Slag", PhD Thesis, The University of Toronto, Department of Civil Engineering, Concrete Materials Group.

Bidin, R., Ngee, C. C., Yeoh, A.K. ve Ping, C. B., (1984), Rice Husk Cement, Standards Industrial Research Institute of Malaysia (=Sirim), Malaysia.

Biricik, H., (1995), Buğday Sapı Külünün Puzolanik Özellikleri ve Külün Çimento Harcının Dayanıklılığına Etkisi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

Bonen, D., (1993), "A Microstructural Study of the Effect Produced by Magnesium Sulfate on Plain and Silica Fume Bearing Portland Cement Mortars", Cement and Concrete Research, 23 (3):541-553.

Brylicki, W., Malolepszy, J. ve Stryzek, S., (1992), "Use of Blast Furnace Slag Cements in the Boreholes in Salt Beds", Fourth Canmet/ACI, Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Vol 2, 1583-1599.

BS 1881: Part 117 (1983), Testing Concrete, Method for Determination of Tensile Splitting Strength.

BS 1881: Part 203, (1986), Recommendations on the Non-Destructive Testing in the Form of Plain, Reinforced and Prestressed Test Specimens, Precast Components and Structures by the Measurement of Ultrasonic Pulse Velocity.

BS 6699, (1992), "Specification for Ground Granulated Blast Furnace Slag for Use With Portland Cement"

CEB-FIB, (1978), Model Code for Concrete Structures, Comite Euro-International du Beton.

Cheng, X. L., Ma, H. Y., Chen, S. H., Yu, R., Chen, X. ve Yao, Z. M., (1999), "Corrosion of Stainless Steels in Acid Solutions With Organic Sulfur-Containing Compounds", Corrosion Science 41: 321-333.

Chia, K. ve Zhang, M. H., (2002), "Water Permeability and Chloride Permeability of High-Strength Lightweight Aggregate Concrete", Cement and Concrete Research, 32: 639-645.

Gręwko, M. A., Cripps, J. C., Reid, J. M. ve Duffell, C. G., (2003), "Sulfur Species in Geological Materials-Sources and Quantification", Cement and Concrete Composites 25: 657-671.

CSA A 23.3-94, Technical Committee, "Design of Concrete Structures (A23.3-94)", Canadian Standard Association, Rexdale, Ontario, 199.

Colleparidi, M. ve Gököz, N.Ü., (1989), "Betonda Zaman İçerisinde Dayanıklılık", 1. Ulusal Beton Kongresi, 24-25-26 Mayıs 1989, İstanbul, 67-78.

Çakır, A. F., (1996), “Yüzey İşlemleri ve Korozyon”, V. Korozyon Sempozyumu Bildirileri, 6-9 Kasım 1996, Çukurova Üniversitesi, Adana, 124-138.

Çakır, A. F., (1997), “Korozyondan Korunmada Gelişmeler: Betonarme Yapılarda ve İnce Sert Seramik Kaplı Metal Yüzeylerinde Korozyon Kontrolü”, 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 11-15.06.1997, İstanbul, Türkiye, Cilt 1, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, Yayın no:37:139-158.

Çakır, A. F., (2000), “17 Ağustos Depreminin Gör Dediği: Betonarme Yapılarda Çelik Donatı Korozyonu ve Kontrolü”, Metal Dünyası Sayı 89 Yıl 9:19-24.

Çakır, Ö. ve Aköz, F., (2001), “Use of Industrial Wastes In Casting Concrete and Effects of Concrete Properties”, Scientific Session VSU’ 2001, May 29-June 1, Sofia, Bulgaria, Vol 2: IV-23, IV-28.

Danson, A., (2002), “Effects of Supplementary Materials On The Strength and Durability of Concrete, MS Thesis, The University of Alabama in Huntsville, UMI Number: 1408336.

Demirbaş, A., Öztürk, T. ve Karataş, F. Ö., (2001), “Long-term Wear On Outside Walls of Buildings by Sulfur Dioxide Corrosion”, Cement and Concrete Research 31: 3-6.

Dongxue, L., Xinhua, F., Xuequan, W. ve Mingshu, T., (1997), “Durability Study of Steel Slag Cement”, Cement and Concrete Research 27: 983-987.

Doruk, M., (1996), “Korozyonun Temel İlkeleri Üzerine”, V. Korozyon Sempozyumu Bildirileri, 6-9 Kasım 1996, Çukurova Üniversitesi, Adana, 1-31.

Duchesne, J. ve Berube, M.A., (2001), “Long-term Effectiveness of Supplementary Cementing Materials Against Alkali-silica Reaction”, Cement and Concrete Research, 31: 1057-1063.

Elsener, B., (2002), “Macrocell Corrosion of Steel in Concrete-Implications for Corrosion Monitoring”, Cement and Concrete Composites 24: 65-72.

Erdoğan, T. Y., (2003), Beton, 1. Baskı, Metu Press, Ankara.

Erdoğan, S., Kondratova, I. L. ve Bremner, T. W., (2004), “Determination of Chloride Diffusion Coefficient of Concrete Using Open-Circuit Potential Measurements”, Cement and Concrete Research 34: 603-609.

Ersoy, U., Özcebe, G., (2001), Betonarme, Geliştirilmiş Yeni Baskı, Evrim Basım Yayın Dağıtım, İstanbul.

Feldman, R. F. ve Cheng-yi, H., (1985), “Resistance of Mortars Containing Silica Fume to Attack by a Solution Containing Chlorides”, Cement and Concrete Research, 15(3):411-420.

Felekoğlu, B., Yardımcı, M. Y. ve Baradan, B., (2003), “Kendiliğinden Yerleşen Betonların Aşınma ve Donma-Çözülme Direnci”, 5. Ulusal Beton Kongresi, 1-2-3 Ekim 2003, İstanbul, 365-374.

Ftikos, C. ve Parissakis, G., (1985), "The Combined Action of Mg^{++} and Cl^- Ions in Cement Pastes", Cement and Concrete Research, 15(4):593-599.

Fukudome, K., Miyano, K., Taniguchi, H. ve Kita, T., (1992), "Resistance to Freezing and Thawing and Chloride Diffusion of Anti-washout Underwater Concrete Containing Blast Furnace Slag", Fourth Canmet/ACI, Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Vol 2., 1565-1582.

Gao, J.M, Qian, C. X., Liu, H. F., Wang, B. ve Li, L., (2005), "ITZ Microstructure of Concrete Containing GGBS", Cement and Concrete Research 35: 1299-1304.

Geiseler, J., Kollo, H. ve Lang, E., (1995), "Influence of Blast Furnace Cements on Durability of Concrete Structures", ACI Materials Journal, Title no:92-M27: 252-257.

Güneyisi, E., Özturan, T. ve Gesoğlu, M., (2003), "Silis Dumanı ve Leucu Kül Katkılı Betonların Klorür Difizyon Katsayılarının Belirlenmesi", 5. Ulusal Beton Kongresi, 1-2-3 Ekim 2003, İstanbul, 143-152.

Güneyisi, E., (2004), "Mechanical and Durability Performance of Plain and Blended Cement Concrete Exposed To Chlorides And Different Curing Regimes", Boğaziçi University, Institute for Graduate Studies in Science and Engineering.

Haque, M. N. ve Kawamura, M., (1992), "Carbonation and Chloride-Induced Corrosion of Reinforcement in Fly Ash Concretes", ACI Materials Journal, Title no:82-M5: 41-48.

Haque, M. N. ve Kayyali, O. A., (1996), "Aspects of Chloride Ion Determination in Concrete", ACI Materials Journal, Title no:92-M55: 532-541.

Hansson, C. M., Frolund, T. ve Markussen, J. B., (1985), "The Effect of Chloride Cation Type on the Corrosion of Steel in Concrete by Chloride Salts", Cement and Concrete Research, 15(1):65-73.

Hinczak, I. ve Cao, H.T., (1992), "Long Term Properties of Slag Cement Mortars and Concretes in Marine and Sulphate Environments", Fourth Canmet/ACI, Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Supplementary Papers, 709-720.

Hussain, S. E., Al-Gahtani, S. A. ve Rasheeduzzafar, (1996), "Chloride Threshold for Corrosion of Reinforcement in Concrete", ACI Materials Journal, Title no:93-M60: 1-5.

Holloway, M. ve Sykes, J. M., (2005), "Studies of The Corrosion of Mild Steel in Alkali-Activated Slag Cement Mortars with Sodium Chloride Admixtures By A Galvanostatic Pulse Method", Corrosion Science 47: 3097-3110.

Hong, K. ve Hooton, R. D., (1999), "Effects of Cyclic Chloride Exposure on Penetration of Concrete Cover", Cement and Concrete Research 29: 1379-1386.

Iravani, S. (1996), "Mechanical Properties of High Strength of High-Performance Concrete", ACI Material Journal, 93-5: 416-426.

Jensen, O.M., Hansen, P. F., Coats, A. M. ve Glasser, F. P., (1999), "Chloride Ingress in Cement Paste and Mortar", Cement and Concrete Research 29: 1497-1504.

Jonsson, J. A., (2002), "Durability and Temperature Related Characteristics of High Performance Concrete", PhD Thesis, Purdue University, UMI Number: 3104967.

Kearsley, E. P. ve Wainwright, P. J., (2001), "Porosity and Permeability of Foamed Concrete", Cement and Concrete Research 31: 805-812.

Khalil, A. M., (2002), "Strength and Durability Assessment of High Performance Concrete", PhD Thesis, The University of Illinois at Chicago, UMI Number: 3058112.

Khan, M. I. ve Lynsdale, C. J., (2002), "Strength, Permeability and Carbonation of High-Performance Concrete", Cement and Concrete Research 32:123-131.

Kılınc, K. ve Uyan, M., (2003), "Beton Karışım Suyundaki Sülfat Tuzlarının Çimento Harcı Özelliklerine Etkisi", 5. Ulusal Beton Kongresi, 1-2-3 Ekim 2003, İstanbul, 393-400.

Khatri, R.P. ve Sirivivatnanon, V., (1997), "Methods for the Determination of Water Permeability", ACI Materials Journal, May-June 1997, Title no:94M-30: 257-261.

Khatri, R. P. ve Sirivivatnanon, V., (2004), "Characteristic Service Life for Concrete Exposed To Marine Environments", Cement and Concrete Research 34:745-752.

Kocataşkın, F., (1975), Yapı Malzemesi Bilimi- Özellikler ve Deneylemler, Düzeltilmiş Dördüncü Baskı, Arpaz Matbaacılık, İstanbul.

Kurdowski, W., (2004), "The Protective Layer and Decalcification of C-S-H in the Mechanism of Chloride Corrosion of Cement Paste", Cement and Concrete Research 34: 1555-1559.

Li, Z. ve Chau, C. K., (2000), "New Water Permeability Test Scheme for Concrete", ACI Materials Journal, January -February 2000, Title no:97M-12: 1-7.

Liu, R., (2000), "Development and Evaluation of Cement-Based Materials for Repair of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Slabs", PhD Thesis, Purdue University, UMI Number: 3018240.

Luo, R., Cai, Y., Wang, C. ve Huang, X., (2003), "Study of Chloride Binding and Diffusion in GGBFS Concrete", Cement and Concrete Research 33: 1-7.

Marfil, S.A. ve Maiza, P.J., (2001), "Deteriorated Pavements Due to the Alkali-silica-Reaction, A Petrographic Study of Three Cases in Argentina", Cement and Concrete Research, 31:1017-1021.

Maslehuddin, M., (2003), "Special Issue on Concrete Durability", Cement and Concrete Composites, 25:399.

Massazza, F., (1989), Puzzolanlar, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.

Mather, B., (2004), "Concrete Durability", Cement and Concrete Composites 26:3-4.

Mazlum, F., (1989), Pirinç Kabuğu Külünün Puzolanik Özellikleri ve Külün Çimento Harcının Dayanıklılığına Etkisi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

Mehta, P. K. ve Gjørsv, O. D., (1982), "Properties of Portland Cement Concrete Containing Fly Ash and Condensed Silica Fume", Cement and Concrete Research, 12:587-585.

Memon, A. H., Radin, S. S., Zain, M. F. M. ve Trottier, J. F., (2002), "Effects of Mineral and Chemical Admixtures on High-strength Concrete in Sea Water", Cement and Concrete Research, 32:373-377.

Mohammed, T. U. ve Hamada, H., (2003), "Relationship Between Free Chloride and Total Chloride Contents in Concrete", Communication, Cement and Concrete Research 33: 1487-1490.

Moukwa, M., (1990), "Characteristics of the Attack of Cement Paste by $MgSO_4$ and $MgCl_2$ from the Pore Structure Measurement", Cement and Concrete Research, 20(1):148-158.

Nakamoto, J. ve Togawa, K., (1995), "A Study of Strength Development and Carbonation of Concrete Incorporating High Volume BFS", V. CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Milwaukee, USA, SP 153-59.

Nakamura, N., Sakai, M. ve Swamy, R.N., (1992), "Effect of Slag Fineness on the Development of Concrete Strength and Microstructure", Fourth Canmet/ACI, Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Volume 2, SP 132-72, sf 1343-1366.

Neville, A. M., (1990), Properties of Concrete, Third Edition, Longman Scientific and Technical, New York.

Neville, A.M. ve Brooks, J.J., (2001), Concrete Technology, Revised Edition, Pearson Education Limited.

Oh, B. H., Cha, S. W., Jang, B. S. ve Jang, S. Y., (2002), "Development of High-Performance Concrete Having High Resistance to Chloride Penetration", Nuclear Engineering and Design 212: 221-231.

Osborne, G. J., (1992), "The Performance of Portland and Blast Furnace Slag Cement in Marine Environments", Fourth Canmet/ACI, Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Vol 2, 1303-1323.

Otsuki, N., Nagataki, S. ve Nakashita, K., (1992), "Effect of Blast Furnace Slag, Silica Fume and Fly Ash on the Properties of Mortar Against Chloride Attack", Fourth Canmet/ACI, Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Supplementary Papers, 1055-1063.

Öner, M., Erdoğan, K. ve Günlü A., (2003), "Effects of Components Fineness of Blast Furnace Slag Cement", Cement and Concrete Research, 33:463-469.

Özkul, H., Taşdemir, M., Tokyay, M. ve Uyan, M., (1999), Her Yönüyle Beton, THBB, İstanbul.

Pal, S. C., Mukherjee, A. ve Pathak, S. R., (2002), "Corrosion Behaviour of Reinforcement in Slag Concrete", ACI Materials Journal, Title no:99-M52: 521-527.

Pereira, R. M. S., (2003), "Accelerated Corrosion Testing, Evaluation and Durability Design of Bonded Post-Tensioned Concrete Tendons", PhD Thesis, The University of Texas at Austin, UMI Number: 3118069.

Perks, R. A., (2000), "Chloride Thresholds For Initiation of Corrosion of Steel Reinforcement In Concrete, MS Thesis, Florida Atlantic University, UMI Number: 1401496.

Philipose, K. E., Beaudin, J. J. ve Feldman, R. F., (1992), "Degradation of Normal Portland and Slag Cement Concrete Under Load Due to Reinforcement Corrosion", Fourth Canmet/ACI, Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Vol 2, 1491-1508.

Pruckner, F. ve Gjørsv, O. E., (2004), "Effect of CaCl_2 and NaCl Additions On Concrete Corrositivity", Cement and Concrete Research 34: 1209-1217.

Polder, R. B. ve Peelen, W. H. A., (2002), "Characterisation of Chloride Transport and Reinforcement Corrosion in Concrete Under Cyclic Wetting and Drying by Electrical Resistivity", Cement Concrete Composites, 24:427-435.

Postacıoğlu., B., (1981), Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri, Cilt 1, İç Yapı ve Mekanik Özellikler, İTÜ Kütüphanesi Sayı: 1176, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul.

Postacıoğlu, B., (1986), Beton, Cilt 1, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul.

Postacıoğlu, B., (1987), Beton, Cilt 2, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul.

Poupard, O, Mokhtar, A. A. ve Dumargue, P., (2004), "Corrosion by Chlorides in Reinforced Concrete:Determination of Chloride Concentration Threshold by Impedance Spectroscopy", Cement and Concrete Research 34: 991-1000.

Sakai, K., Watanabe, H., Suzuki, M. ve Hamazaki, K., (1992), "Properties of Granulated Blast-Furnace Slag Cement Concrete", Fourth Canmet/ACI, Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Vol 2, 1367-1383.

Sagüés, A. A. ve Pech-Canul, M. A., (2003), "Corrosion Macrocell Behaviour of Reinforcing Steel in Partially Submerged Concrete Columns", Corrosion Science 45: 7-32.

Saremi, M. ve Mahallati, E., (2002), "A Study On Chloride-Induced Depassivation of Mild Steel in Simulated Concrete Pore Solution", Cement and Concrete Research 32: 1915-1921.

Sarıcımen, H., Maslehuddin, M., Shamim, M., Khan, M.S. ve Tayyib, A. J. A., (1992), "Effect of Curing on the Permeability of Plain and Pozzolanic Concrete", Fourth Canmet/ACI, Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Supplementary Papers, 95-108.

Sarıcımen, H., Maslehuddin, M., Tayyib, A. J. A. ve Mana, A. I. Al., (1995), "Permeability and Durability of Plain and Blended Cement Concretes Cured in Field and Laboratory Conditions", ACI Materials Journal, March -April 1995, Title no:92-M12: 1-6.

Schießl, P. ve Raupach, M., (1997), "Laboratory Studies and Calculations on the Influence of Crack Width on Chloride-Induced Corrosion of Steel in Concrete", ACI Materials Journal, Title no. 94-M7:1-8.

Shah, S. P., Wang, K. ve Weiss, J., (2003), "Dayanıklı Beton İçin Bileşim Dizaynı", Çeviri, THBB Dergisi, Ocak-Şubat 2003, 61-67.

Shehata, M. H. ve Thomas, M. D.A., (2002), "Use of Ternary Blends Containing Silica Fume and Fly Ash to Suppress Expansion Due to Alkali-silica Reaction in Concrete", Cement and Concrete Research, 32: 341-349.

Soleymani, H. R. ve Ismail, M. E., (2004), "Comparing Corrosion Measurement Methods to Assess the Corrosion Activity of Laboratory OPC and HPC concrete Specimens", Cement and Concrete Research 34: 2037-2044.

Şahin, R., Taşdemir, M.A., Gül, R. ve Çelik, C., (2003), "Betonun Dolgu Hasarının Mekanik Deneyle Analizi", 5. Ulusal Beton Kongresi, 1-2-3 Ekim 2003, İstanbul, 333-343.

Taşdemir, M. A. ve Akyüz S., (1999), "Betonun Durabilitesi Üzerine Genel Bir Değerlendirme", THBB Dergisi, Yıl 6 sayı 32.

Taşdemir, M.A., Taşdemir, C., Özbek, E. ve Altay, B., (2000), "ÖYFC İnceliğinin Beton Özelliklerine ve Mikroyapısına Etkisi", Çimento ve Beton Dünyası Dergisi, Yıl 4, Sayı 24, TÇMB Yayın Organı, 19-36.

Tomisawa, T., Chikada, T. ve Nagao, Y., (1992), "Properties of Super Low Heat Cement Incorporating Large Amounts of Ground Granulated Blast Furnace Slag of High Fineness", Fourth Canmet/ACI, Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Vol 2, 1385-1399.

Torii, K. ve Kawamura, M., (1992), "Pore Structure and Chloride Permeability of Concretes Containing Fly Ash, Blast Furnace Slag, and Silica Fume", Fourth CANMET/ACI, International Conference on Fly ash, Blast Furnace Slag, Silica Fume and Natural Pozzolans in Concrete, Vol 1, SP132-9,135-150.

TS 25, (1975) Tas.

TS 3529, (1980), Beton Agregalarının Birim Ağırlıklarının Tayini.

TS 3440, (1982), Zararlı Kimyasal Etkileri Olan Su, Zemin ve Gazların Etkisinde Kalacak Betonlar için Yapım Kuralları.

TS 708, (1996), Beton Çelik Çubukları.

TS 500, (2000), Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları.

TS EN 196-1, (2002), Çimento Deney Metotları- Bölüm 1: Dayanım Tayini

TS EN 196-5, (2002), Çimento Deney Metotları- Bölüm 5: Puzolanik Çimentolarda Puzolanik Özellik Tayini

TS EN 197-1, (2002), Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellik ve Uygunluk Kriterleri.

TS EN 206-1, (2002), Beton-Bölüm 1. Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk.

TS EN 12350-2, (2002), Beton-Taze Beton Deneyleri-Bölüm 2: Çökme (Slamp) Deneyi.

TS EN 12350-6, (2002), Beton-Taze Beton Deneyleri-Bölüm 6: Yoğunluk

TS EN 12350-7, (2002), Beton-Taze Beton Deneyleri-Bölüm 7: Hava Muhtevası Tayini-Basma Metodları.

TS EN 12390-3, (2002), Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımı Tayini.

TS EN 12390-7, (2002), Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 7: Sertleşmiş Betonun Yoğunluğunun Tayini.

TS EN 12390-8, (2002), Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 8: Basınç Altında Su İşleme Derinliğinin Tayini.

TS 706 EN 12629, (2003), Beton Agregaları.

Türkmen, İ., Gavgalı M. ve Gül, R., (2003), "Influence of Mineral Admixtures on the Mechanical Properties and Corrosion of Steel Embedded in High Strength Concrete", Materials Letters, 57: 2037-2043.

Uğurlu, A., (2003), "Sulama Kanallarında Sülfat Problemi ve Çözüm Önerileri", 5. Ulusal Beton Kongresi, 1-2-3 Ekim 2003, İstanbul, 567-574.

Üneri, S., (2002), "Korozyonda Temel İlkeler", VIII. Uluslararası Korozyon Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 9-12 Ekim 2002, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, İstanbul, 1-28.

Wakizawa, Y., (2000), "Alkali-silica Reactivity of Japanese Rocks", Engineering Geology 56: 211-221.

Win, P.P., Watanabe, M. ve Machida, A., (2004), "Penetration Profile of Chloride Ion in Cracked Reinforced Concrete", Cement and Concrete Research 34: 1073-1079.

Vedalakshmi, R., Kumar, K., Raju, V. ve Rengaswamy, N. S., (2000), "Effect of Prior Damage On The Performance of Cement Based Coatings on Rebar: Macrocell Corrosion Studies", Cement and Concrete Composites 22: 417-421.

Yang, C. C. ve Wang, L. C., (2004), "The Diffusion Characteristic of Concrete With Mineral Admixtures Between Salt Ponding Test and Accelerated Chloride Migration Test", Materials Chemistry and Physics 85: 266-272.

Yang, C. C. ve Cho, S. W., (2003), "An Electrochemical Method for Accelerated Chloride Migration Test of Diffusion Coefficient in Cement-Based Materials", Materials Chemistry and Physics 81: 116-125.

Yeau, K. Y. ve Kim, E. K., (2005), "An Experimental Study on Corrosion Resistance of Concrete With Ground Granulate Blast-Furnace Slag", Cement and Concrete Research 35: 1391-1399.

Yerlici, V. ve Ersoy, U., (1995), "Betonun Çekme ve Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki", TMMOB İnşaat Odası, Teknik Dergi, 6- 4:1059-1062..

Yüzer, N., (1998), "Silis Dumanı Katkılı Betonarme Elemanlara Klorür Etkisinin Hızlandırılmış Korozyon Deneyi ile Araştırılması", Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yüzer, N. ve Aköz, F., (2003b), "Silis Dumanı Katkılı Betona Klorür Etkisi", 5. Ulusal Beton Kongresi, 1-2-3 Ekim 2003, İstanbul, 65-74.

Yüzer, N. ve Aköz, F., (2003a), "Donatı Korozyonunun Hızlandırılmış Deney Yöntemi ile Araştırılması", 5. Ulusal Beton Kongresi, 1-2-3 Ekim 2003, İstanbul, 227-236.

Yüzer, N. ve Aköz, F., (2005), "Klorür Etkisindeki Betonun Basınç ve Çekme Dayanımı Arasındaki İlişki", İMO Teknik Dergi, 3673-3681

Zhang, J. Z., McLoughlin, I. M. ve Buenfeld N. R., (1998), "Modelling of Chloride Diffusion Into Surface-treated Concrete", Cement and Concrete Composites 20: 253-261.

INTERNET KAYNAKLARI

[1]www.fsec.ucf.edu

[2]www.mta.gov.tr

EKLER

Copyright of Geowebtech, Inc. [Http://www.geowebtech.com](http://www.geowebtech.com)

Çizelge Ek 1 YFC katkısız betonların deney sonuçları

| YFC İçeriği | Ortam | Beton Kodu | Çevrim Sayısı | Beton Yaşı (Gün) | Δ (kg/m ³) | V (m/sn) | f_c (MPa) | f_{cts} (MPa) | Su Emme Değerleri | | Su İşl.D. h_w (mm) | Karbont derinliği d_c (mm) | Cl Konsantrasyonu (mg/l) | | |
|--------------|-------------|------------|---------------|------------------|-------------------------------|----------|-------------|-----------------|-------------------|-------|----------------------|------------------------------|--------------------------|----------|----------|
| | | | | | | | | | % a_s | % h | | | 0-10 mm | 20-30 mm | 45-50 mm |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| YFC KATKISIZ | SU | C0W | 0 | 28 | 2369 | 4799 | 40.1 | 2.8 | 4.4 | 10.4 | 0 | 0.0 | 0 | 1 | 0 |
| | | | 1 | 56 | 2347 | 4785 | 42.0 | 3.0 | 4.1 | 9.7 | 0 | 0.0 | 7 | 14 | 7 |
| | | | 3 | 112 | 2345 | 4794 | 46.1 | 3.2 | 4.0 | 9.5 | 13 | 0.0 | 10 | 0 | 0 |
| | | | 6 | 196 | 2343 | 4843 | 39.8 | 3.3 | 3.7 | 8.8 | 6 | 0.0 | 16 | 0 | 0 |
| | | | 9 | 280 | 2337 | 4857 | 47.1 | 2.7 | 3.3 | 7.9 | 5 | 0.0 | 11 | 3 | 2 |
| | | | 12 | 364 | 2353 | 4796 | 50.6 | 3.4 | 3.1 | 7.4 | 6 | 0.0 | 27 | 10 | 10 |
| | 10.000 mg/L | C0M1 | 1 | 56 | 2354 | 4806 | 44.0 | 2.8 | 4.1 | 9.7 | 0 | 0.0 | 76 | 3 | 0 |
| | | | 3 | 112 | 2363 | 4805 | 38.1 | 2.4 | 4.0 | 9.5 | 4 | 0.0 | 428 | 2 | 0 |
| | | | 6 | 196 | 2362 | 4816 | 50.0 | 2.8 | 3.6 | 8.5 | 4 | 0.0 | 677 | 11 | 2 |
| | | | 9 | 280 | 2366 | 4851 | 49.4 | 2.9 | 3.5 | 8.3 | 6 | 0.0 | 585 | 31 | 6 |
| | | | 12 | 364 | 2381 | 4805 | 50.2 | 3.1 | 2.7 | 6.4 | 8 | 0.0 | 714 | 219 | 34 |
| | 40.000 mg/L | C0M4 | 1 | 56 | 2342 | 4514 | 38.4 | 1.8 | 3.7 | 8.7 | 0 | 0.0 | 196 | 0 | 0 |
| | | | 3 | 112 | 2364 | 4692 | 39.1 | 2.9 | 3.9 | 9.3 | 7 | 0.0 | 620 | 16 | 1 |
| | | | 6 | 196 | 2345 | 4859 | 43.8 | 2.9 | 3.6 | 8.5 | 6 | 0.0 | 796 | 15 | 1 |
| | | | 9 | 280 | 2354 | 4833 | 45.1 | 3.0 | 3.5 | 8.3 | 9 | 0.0 | 788 | 64 | 7 |
| 12 | | | 364 | 2378 | 4788 | 47.7 | 3.1 | 2.9 | 6.9 | 12 | 0.0 | 888 | 301 | 58 | |

Çizelge Ek 2 %30 YFC katkılı betonların deney sonuçları

| YFC içeriği | Ortam | Beton Kodu | Çevrim Sayısı | Beton Yaşı (Gün) | Δ (kg/m ³) | V (m/sn) | f_c (MPa) | f_{cts} (MPa) | Su Emme Değerleri | | Su İşl.D. h_w (mm) | Karbont derinliği d_c (mm) | Cl Konsantrasyonu (mg/l) | | |
|-----------------|-------------|------------|---------------|------------------|-------------------------------|----------|-------------|-----------------|-------------------|---------|----------------------|------------------------------|--------------------------|----------|----------|
| | | | | | | | | | % a_s | % h_s | | | 0-10 mm | 20-30 mm | 45-50 mm |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| %30 YFC KATKILI | SU | C3W | 0 | 28 | 2354 | 4735 | 34.4 | 3.1 | 4.2 | 9.8 | 0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 |
| | | | 1 | 56 | 2344 | 4807 | 35.2 | 3.7 | 4.0 | 9.3 | 0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 |
| | | | 3 | 112 | 2345 | 4768 | 36.4 | 3.6 | 3.8 | 9.2 | 8 | 0.0 | 0 | 0 | 0 |
| | | | 6 | 196 | 2335 | 4823 | 35.4 | 2.0 | 4.0 | 9.3 | 9 | 1.0 | 0 | 0 | 0 |
| | | | 9 | 280 | 2341 | 4867 | 38.7 | 2.8 | 3.3 | 7.7 | 9 | 1.0 | 2 | 2 | 1 |
| | | | 12 | 364 | 2349 | 4805 | 46.9 | 2.9 | 2.6 | 6.2 | 12 | 1.0 | 27 | 21 | 17 |
| | 10.000 mg/L | C3M1 | 1 | 56 | 2344 | 4814 | 36.4 | 2.7 | 3.8 | 8.9 | 4 | 0.0 | 176 | 0 | 0 |
| | | | 3 | 112 | 2349 | 4801 | 37.9 | 3.1 | 3.8 | 8.9 | 6 | 0.0 | 370 | 0 | 0 |
| | | | 6 | 196 | 2344 | 4787 | 37.8 | 3.4 | 3.8 | 9.0 | 8 | 0.0 | 426 | 0 | 0 |
| | | | 9 | 280 | 2356 | 4841 | 36.0 | 2.7 | 3.0 | 7.0 | 8 | 0.5 | 439 | 3 | 1 |
| | | | 12 | 364 | 2374 | 4795 | 43.1 | 2.9 | 2.4 | 6.3 | 11 | 1.0 | 637 | 18 | 23 |
| | 40.000 mg/L | C3M4 | 1 | 56 | 2350 | 4813 | 37.3 | 3.1 | 3.7 | 8.8 | 8 | 0.0 | 199 | 0 | 0 |
| | | | 3 | 112 | 2359 | 4773 | 41.2 | 2.1 | 3.9 | 9.1 | 9 | 0.0 | 562 | 3 | 7 |
| | | | 6 | 196 | 2364 | 4840 | 38.6 | 2.5 | 3.7 | 8.7 | 10 | 0.0 | 710 | 1 | 0 |
| | | | 9 | 280 | 2352 | 4876 | 43.1 | 2.9 | 3.5 | 7.3 | 11 | 0.0 | 545 | 3 | 3 |
| 12 | | | 364 | 2375 | 4807 | 43.5 | 3.7 | 2.6 | 6.2 | 14 | 0.5 | 909 | 80 | 23 | |

Çizelge Ek 3 %60 YFC katkılı betonların deney sonuçları

| YFC İçeriği | Ortam | Beton Kodu | Çevrim Sayısı | Beton Yaşı (Gün) | Δ (kg/m ³) | V (m/sn) | f_c (MPa) | f_{cts} (MPa) | Su Emme Değerleri | | Su İşl.D. h_w (mm) | Karbont derinliği d_c (mm) | Cl Konsantrasyonu (mg/l) | | |
|-----------------|-------------|------------|---------------|------------------|-------------------------------|----------|-------------|-----------------|-------------------|-------|----------------------|------------------------------|--------------------------|----------|----------|
| | | | | | | | | | % a_s | % h | | | 0-10 mm | 20-30 mm | 45-50 mm |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| %60 YFC KATKILI | SU | C6W | 0 | 28 | 2342 | 4625 | 28.0 | 2.7 | 4.5 | 10.5 | 8 | 0.0 | 0 | 0 | 0 |
| | | | 1 | 56 | 2316 | 4641 | 34.2 | 2.8 | 4.0 | 9.3 | 9 | 0.0 | 0 | 0 | 0 |
| | | | 3 | 112 | 2324 | 4779 | 36.1 | 2.7 | 3.7 | 8.7 | 10 | 0.0 | 0 | 0 | 0 |
| | | | 6 | 196 | 2317 | 4781 | 40.2 | 2.9 | 3.4 | 8.5 | 13 | 3.0 | 2 | 0 | 0 |
| | | | 9 | 280 | 2321 | 4781 | 41.1 | 2.9 | 3.1 | 7.4 | 14 | 3.5 | 0 | 1 | 0 |
| | | | 12 | 364 | 2349 | 4719 | 41.0 | 3.2 | 2.2 | 5.3 | 8 | 3.5 | 22 | 19 | 17 |
| | 10.000 mg/L | C6M1 | 1 | 56 | 2312 | 4731 | 35.1 | 2.7 | 3.9 | 9.1 | 5 | 0.0 | 161 | 0 | 0 |
| | | | 3 | 112 | 2321 | 4791 | 36.9 | 2.5 | 4.0 | 9.5 | 7 | 0.0 | 228 | 1 | 0 |
| | | | 6 | 196 | 2321 | 4826 | 40.2 | 2.8 | 3.7 | 8.6 | 8 | 0.5 | 249 | 1 | 1 |
| | | | 9 | 280 | 2347 | 4805 | 38.3 | 2.7 | 3.1 | 7.2 | 10 | 0.5 | 215 | 3 | 4 |
| | | | 12 | 364 | 2347 | 4757 | 44.1 | 3.0 | 2.3 | 5.4 | 12 | 1.5 | 344 | 24 | 19 |
| | 40.000 mg/L | C6M4 | 1 | 56 | 2308 | 4741 | 35.9 | 3.1 | 4.4 | 10.2 | 8 | 0.0 | 323 | 2 | 0 |
| | | | 3 | 112 | 2337 | 4728 | 37.3 | 2.5 | 3.9 | 9.1 | 11 | 0.0 | 499 | 2 | 2 |
| | | | 6 | 196 | 2311 | 4710 | 37.0 | 3.3 | 3.8 | 8.9 | 12 | 0.5 | 704 | 3 | 1 |
| | | | 9 | 280 | 2337 | 4713 | 37.9 | 2.8 | 3.3 | 7.7 | 14 | 0.2 | 246 | 1 | 1 |
| | | | 12 | 364 | 2341 | 4664 | 38.5 | 2.6 | 2.3 | 5.4 | 15 | 0.5 | 774 | 47 | 14 |

Çizelge Ek 4 YFC katkısız betonların bağıntılardan hesaplanmış elastisite modülü değerleri

| YFC İçeriği | Ortam | Beton Numune Kodu | Çevrim Sayısı | Beton Yaşı (Gün) | Statik Elastisite Modülü | | | | Dinamik Elastisite Modülü |
|--------------|-------------|-------------------|---------------|------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| | | | | | E _{s1} (GPa) | E _{s2} (GPa) | E _{s3} (GPa) | E _{s4} (GPa) | E _d (GPa) |
| YFC KATKISIZ | SU | C0W | 0 | 28 | 30.0 | 27.8 | 34.6 | 34.1 | 48.1 |
| | | | 1 | 56 | 30.7 | 28.3 | 35.1 | 34.5 | 47.7 |
| | | | 3 | 112 | 32.1 | 29.3 | 36.1 | 35.5 | 47.9 |
| | | | 6 | 196 | 29.8 | 27.7 | 34.5 | 34.0 | 48.8 |
| | | | 9 | 280 | 32.5 | 29.5 | 36.3 | 35.7 | 49.0 |
| | | | 12 | 364 | 33.6 | 30.4 | 37.1 | 36.4 | 48.1 |
| | 10.000 mg/L | C0M1 | 1 | 56 | 31.4 | 28.8 | 35.6 | 35.0 | 48.3 |
| | | | 3 | 112 | 29.2 | 27.3 | 34.1 | 33.6 | 48.4 |
| | | | 6 | 196 | 33.4 | 30.2 | 37.0 | 36.3 | 48.6 |
| | | | 9 | 280 | 33.2 | 30.1 | 36.8 | 36.2 | 49.4 |
| | | | 12 | 364 | 33.5 | 30.3 | 37.0 | 36.3 | 48.8 |
| | 40.000 mg/L | C0M4 | 1 | 56 | 29.3 | 27.3 | 34.1 | 33.7 | 42.4 |
| | | | 3 | 112 | 29.6 | 27.5 | 34.3 | 33.9 | 46.2 |
| | | | 6 | 196 | 31.3 | 28.7 | 35.5 | 35.0 | 49.1 |
| | | | 9 | 280 | 31.8 | 29.1 | 35.8 | 35.2 | 48.8 |
| | | | 12 | 364 | 32.7 | 29.7 | 36.4 | 35.8 | 48.4 |

Çizelge Ek 5 %30 YFC katkılı betonların bağıntılardan hesaplanmış elastisite modülü değerleri

| YFC İçeriği | Ortam | Beton Numune Kodu | Çevrim Sayısı | Beton Yaşı (Gün) | Statik Elastisite Modülü | | | | Dinamik Elastisite Modülü |
|-----------------|-------------|-------------------|---------------|------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| | | | | | E _{s1} (GPa) | E _{s2} (GPa) | E _{s3} (GPa) | E _{s4} (GPa) | E _d (GPa) |
| %30 YFC KATKILI | SU | C3W | 0 | 28 | 27.7 | 26.3 | 33.1 | 32.7 | 47.2 |
| | | | 1 | 56 | 28.1 | 26.5 | 33.3 | 32.9 | 48.0 |
| | | | 3 | 112 | 28.5 | 26.8 | 33.6 | 33.2 | 47.3 |
| | | | 6 | 196 | 28.1 | 26.5 | 33.3 | 33.0 | 48.2 |
| | | | 9 | 280 | 29.4 | 27.4 | 34.2 | 33.8 | 49.2 |
| | | | 12 | 364 | 32.4 | 29.5 | 36.3 | 35.6 | 48.2 |
| | 10.000 mg/L | C3M1 | 1 | 56 | 28.4 | 26.7 | 33.5 | 33.1 | 48.2 |
| | | | 3 | 112 | 29.1 | 27.2 | 34.0 | 33.6 | 48.1 |
| | | | 6 | 196 | 29.1 | 27.2 | 34.0 | 33.6 | 47.7 |
| | | | 9 | 280 | 28.4 | 26.7 | 33.5 | 33.1 | 49.0 |
| | | | 12 | 364 | 31.1 | 28.6 | 35.3 | 34.8 | 48.5 |
| | 40.000 mg/L | C3M4 | 1 | 56 | 28.9 | 27.1 | 33.8 | 33.4 | 48.3 |
| | | | 3 | 112 | 30.4 | 28.1 | 34.9 | 34.4 | 47.7 |
| | | | 6 | 196 | 29.4 | 27.4 | 34.2 | 33.8 | 49.2 |
| | | | 9 | 280 | 31.1 | 28.6 | 35.3 | 34.8 | 49.7 |
| | | | 12 | 364 | 31.2 | 28.7 | 35.4 | 34.9 | 48.7 |

Çizelge Ek 6 %60 YFC katkılı betonların bağıntılardan hesaplanmış elastisite modülü değerleri

| YFC İçeriği | Ortam | Beton Numune Kodu | Çevrim Sayısı | Beton Yaşı (Gün) | Statik Elastisite Modülü | | | | Dinamik Elastisite Modülü |
|-----------------|-------------|-------------------|---------------|------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| | | | | | E _{s1} (GPa) | E _{s2} (GPa) | E _{s3} (GPa) | E _{s4} (GPa) | E _d (GPa) |
| %60 YFC KATKILI | SU | C6W | 0 | 28 | 25.0 | 24.4 | 31.2 | 31.0 | 44.5 |
| | | | 1 | 56 | 27.7 | 26.2 | 33.0 | 32.7 | 44.3 |
| | | | 3 | 112 | 28.4 | 26.7 | 33.5 | 33.1 | 47.1 |
| | | | 6 | 196 | 30.0 | 27.8 | 34.6 | 34.1 | 47.0 |
| | | | 9 | 280 | 30.3 | 28.1 | 34.8 | 34.3 | 47.1 |
| | | | 12 | 364 | 30.3 | 28.0 | 34.8 | 34.3 | 46.5 |
| | 10.000 mg/L | C6M1 | 1 | 56 | 28.0 | 26.5 | 33.3 | 32.9 | 46.0 |
| | | | 3 | 112 | 28.7 | 26.9 | 33.7 | 33.3 | 47.3 |
| | | | 6 | 196 | 30.0 | 27.8 | 34.6 | 34.1 | 48.0 |
| | | | 9 | 280 | 29.3 | 27.3 | 34.1 | 33.7 | 48.1 |
| | | | 12 | 364 | 31.4 | 28.8 | 35.6 | 35.0 | 47.7 |
| | | | 1 | 56 | 28.3 | 26.7 | 33.5 | 33.1 | 46.1 |
| | 40.000 mg/L | C6M4 | 3 | 112 | 28.9 | 27.1 | 33.8 | 33.4 | 46.2 |
| | | | 6 | 196 | 28.8 | 27.0 | 33.8 | 33.4 | 45.5 |
| | | | 9 | 280 | 29.1 | 27.2 | 34.0 | 33.6 | 46.1 |
| | | | 12 | 364 | 29.3 | 27.4 | 34.2 | 33.7 | 45.2 |

Çizelge Ek 7 YFC katkılı ve katkısız betonarme numunelerin deney sonuçları

| YFC İçeriği | Betonarme Numune Kodu | Karbonatlaşma Derinliği | Cl Konsantrasyonu (mg/l) | | | Donatılar | |
|-----------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------|----------|----------|--------------------|-------------------------------|
| | | d _c (mm) | 0-10 mm | 10-20 mm | 20-30 mm | W _k (%) | Korozyon Oluşan Bölge (l, mm) |
| YFC Katkısız | RC0W-1 | 0.5 | 40 | 36 | | 0.021 | 13 |
| | RC0W-2 | 0.5 | 46 | 25 | 16 | - | - |
| | RC0M1-1 | 0.0 | 769 | 389 | 290 | 0.043 | 33 |
| | RC0M1-2 | 0.5 | 849 | 439 | 312 | - | - |
| | RC0M4-1 | 0.0 | 1009 | 589 | 383 | 0.043 | 37 |
| | RC0M4-2 | 0.0 | 1039 | 639 | 339 | - | - |
| %30 YFC Katkılı | RC3W-1 | 1.5 | 36 | 28 | 20 | 0.042 | 17 |
| | RC3W-2 | 1.0 | 45 | 30 | 22 | - | - |
| | RC3M1-1 | 1.5 | 752 | 174 | 19 | 0.043 | 22 |
| | RC3M1-2 | 1.5 | 684 | 163 | 34 | - | - |
| | RC3M4-1 | 1.0 | 1039 | 309 | 73 | 0.043 | 27 |
| | RC3M4-2 | 1.5 | 974 | 289 | 134 | - | - |
| %60 YFC Katkılı | RC6W-1 | 4.0 | 41 | 28 | 20 | 0.043 | 15 |
| | RC6W-2 | 4.5 | 40 | 30 | 21 | - | - |
| | RC6M1-1 | 1.5 | 422 | 139 | 36 | 0.043 | 20 |
| | RC6M1-2 | 2.0 | 501 | 112 | 50 | - | - |
| | RC6M4-1 | 1.0 | 976 | 292 | 51 | 0.043 | 20 |
| | RC6M4-2 | 1.0 | 1002 | 269 | 68 | - | - |

Çizelge Ek 8 Birim ağırlık (Δ , kg/m^3)-ses geçiş hızı (V , km/sn) bağıntıları

| Numune Kodu | Δ - V Bağıntıları | R |
|-------------|-----------------------------------|------|
| C0,C3,C6 | $y = 329.73\text{Ln}(x)+1829.72$ | 0.26 |
| C0 | $y = 66.679\text{Ln}(x)+2251.12$ | 0.09 |
| C3 | $y = -445.40\text{Ln}(x)+3052.74$ | 0.28 |
| C6 | $y = -166.36\text{Ln}(x)+2586.35$ | 0.15 |

Çizelge Ek 9 Basınç dayanımı (f_c , MPa)-ses geçiş hızı (V , km/sn) bağıntıları

| Numune Kodu | f_c - V Bağıntıları | R |
|-------------|---------------------------------|------|
| C0,C3,C6 | $y = 142.55\text{Ln}(x)-182.66$ | 0.42 |
| C0 | $y = 113.77\text{Ln}(x)-133.75$ | 0.45 |
| C3 | $y = 97.75\text{Ln}(x)-114.68$ | 0.20 |
| C6 | $y = 176.20\text{Ln}(x)-236.44$ | 0.60 |

Çizelge Ek 10 Hacimce su emme (h_s , %) - zaman (t , gün) bağıntıları

| Numune Kodu | h_s - t Bağıntıları | R |
|-------------|-------------------------------|------|
| C0W | $y=-1.62\text{Ln}(x) + 10.72$ | 0.94 |
| C3W | $y=-1.61\text{Ln}(x) + 10.34$ | 0.78 |
| C6W | $y=-2.42\text{Ln}(x) + 10.93$ | 0.90 |
| C0M1 | $y=-1.88\text{Ln}(x) + 10.86$ | 0.88 |
| C3M1 | $y=-1.70\text{Ln}(x) + 10.19$ | 0.84 |
| C6M1 | $y=-2.38\text{Ln}(x) + 10.99$ | 0.87 |
| C0M4 | $y=-1.54\text{Ln}(x) + 10.37$ | 0.88 |
| C3M4 | $y=-1.69\text{Ln}(x) + 10.17$ | 0.85 |
| C6M4 | $y=-2.43\text{Ln}(x) + 11.29$ | 0.86 |

Çizelge Ek 11 Basınçlı su işleme derinliği (h_w , mm)-zaman (t , gün) bağıntıları

| Numune Kodu | h_w - t Bağıntıları | R |
|-------------|-----------------------------|------|
| C0W | $y=4.19\text{Ln}(x) - 0.81$ | 0.60 |
| C3W | $y=6.67\text{Ln}(x) - 2.70$ | 0.87 |
| C6W | $y=5.46\text{Ln}(x) + 2.21$ | 0.82 |
| C0M1 | $y=4.09\text{Ln}(x) - 1.84$ | 0.87 |
| C3M1 | $y=5.78\text{Ln}(x) - 1.75$ | 0.94 |
| C6M1 | $y=4.97\text{Ln}(x) + 1.09$ | 0.89 |
| C0M4 | $y=6.19\text{Ln}(x) - 2.69$ | 0.86 |
| C3M4 | $y=7.46\text{Ln}(x) - 1.65$ | 0.94 |
| C6M4 | $y=7.23\text{Ln}(x) + 0.91$ | 0.98 |

Çizelge Ek 12 Basınç dayanımı (f_c , MPa) –zaman (t, gün) bağıntıları

| Numune Kodu | f_c -t Bağıntıları | R |
|-------------|---------------------------------|------|
| C0W | $y=21.74 \text{ Ln}(x) + 11.48$ | 0.87 |
| C3W | $y=19.23 \text{ Ln}(x) + 9.02$ | 0.88 |
| C6W | $y=1.36 \text{ Ln}(x) + 0.80$ | 0.85 |
| C0M1 | $y=22.96 \text{ Ln}(x) + 10.87$ | 0.88 |
| C3M1 | $y=18.08 \text{ Ln}(x) + 10.17$ | 0.86 |
| C6M1 | $y=19.23 \text{ Ln}(x) + 9.02$ | 0.94 |
| C0M4 | $y=20.87 \text{ Ln}(x) + 10.90$ | 0.87 |
| C3M4 | $y=19.89 \text{ Ln}(x) + 9.80$ | 0.89 |
| C6M4 | $y=18.33 \text{ Ln}(x) + 8.34$ | 0.90 |

Çizelge Ek 13 Yarma dayanımı (f_{cts} , MPa)-zaman (t, gün) bağıntıları

| Numune Kodu | f_{cts} -t Bağıntıları | R |
|-------------|-------------------------------|------|
| C0W | $y=1.43 \text{ Ln}(x) + 0.89$ | 0.83 |
| C3W | $y=1.08 \text{ Ln}(x) + 1.27$ | 0.58 |
| C6W | $y=1.33 \text{ Ln}(x) + 0.80$ | 0.85 |
| C0M1 | $y=1.29 \text{ Ln}(x) + 0.83$ | 0.82 |
| C3M1 | $y=1.27 \text{ Ln}(x) + 1.01$ | 0.75 |
| C6M1 | $y=1.25 \text{ Ln}(x) + 0.82$ | 0.82 |
| C0M4 | $y=1.39 \text{ Ln}(x) + 0.66$ | 0.85 |
| C3M4 | $y=1.31 \text{ Ln}(x) + 0.89$ | 0.75 |
| C6M4 | $y=1.22 \text{ Ln}(x) + 0.95$ | 0.75 |

Çizelge Ek 14 Elastisite modülü (E, GPa) – basınç dayanımı(f_c , MPa) bağıntıları

| Bağıntı Kodu | (E_{s3}, E_d)- f_c Bağıntıları | R |
|--------------|--------------------------------------|------|
| E_s/f_c | $y = 10.30 \text{ Ln}(x) - 3.40$ | 0.99 |
| E_d/f_c | $y = 6.30 \text{ Ln}(x) + 24.34$ | 0.51 |

Çizelge Ek 15 Modül oranı (E_{s3}/E_d)- basınç dayanımı(f_c , MPa) bağıntıları

| Bağıntı Kodu | (E_{s3}/E_d)- f_c Bağıntıları | R |
|--------------------|-------------------------------------|------|
| $E_{s3}/E_d - f_c$ | $y = 0.1184 \text{ Ln}(x) + 0.2908$ | 0.58 |

Çizelge Ek 16 Karbonatlaşma derinliği (d_c , mm)-zaman (t, gün) bağıntıları (Beton)

| Numune Kodu | d_c -t Bağıntıları | R |
|-------------|---------------------------|------|
| C0W | $y=0$ | - |
| C3W | $y=0.6366 \ln(x) - 0.311$ | 0.75 |
| C6W | $y=1.847 \ln(x) - 0.893$ | 0.73 |
| C0M1 | $y=0$ | - |
| C3M1 | $y=0.231 \ln(x) - 0.139$ | 0.65 |
| C6M1 | $y=0.525 \ln(x) - 0.318$ | 0.65 |
| C0M4 | $y=0$ | - |
| C3M4 | $y=0.129 \ln(x) - 0.086$ | 0.47 |
| C6M4 | $y=0.199 \ln(x) - 0.099$ | 0.56 |

Çizelge Ek 17 Karbonatlaşma derinliği (d_c , mm)-YFC oranı bağıntıları (Betonarme)

| Bağıntı Kodu | d_c - YFC oranı Bağıntıları | R |
|--------------|-------------------------------|------|
| W | $y=3.162 \ln(x) + 0.1113$ | 0.89 |
| M1 | $y=1.564 \ln(x) + 0.3686$ | 0.98 |
| M4 | $y=1.006 \ln(x) + 0.1489$ | 0.85 |

Çizelge Ek 18 Klorür konsantrasyonu (Cl^- , mg/l)-zaman (t, gün) bağıntıları (Beton)

| Numune Kodu | Cl^- Konsantrasyonu-t Bağıntıları | R |
|-------------|-------------------------------------|------|
| C0M1 | $y=420.65 \ln(x) - 158.01$ | 0.90 |
| C3M1 | $y=328.31 \ln(x) - 107.27$ | 0.93 |
| C6M1 | $y=174.32 \ln(x) - 41.30$ | 0.93 |
| C0M4 | $y=530.03 \ln(x) - 175.85$ | 0.93 |
| C3M4 | $y=470.35 \ln(x) - 154.96$ | 0.91 |
| C6M4 | $y=364.57 \ln(x) - 80.29$ | 0.80 |

Çizelge Ek 19 Klorür konsantrasyonu (Cl^- , mg/l)-derinlik (d, mm) bağıntıları (Betonarme)

| Numune Kodu | Cl^- Konsantrasyonu-d Bağıntıları | R |
|-------------|-------------------------------------|------|
| RC0M1 | $y=-473.97 \ln(x) + 791.08$ | 0.99 |
| RC3M1 | $y=-647.50 \ln(x) + 690.72$ | 0.98 |
| RC6M1 | $y=-391.71 \ln(x) + 443.62$ | 0.98 |
| RC0M4 | $y=-602.20 \ln(x) + 1026.00$ | 0.99 |
| RC3M4 | $y=-843.27 \ln(x) + 972.98$ | 0.99 |
| RC6M4 | $y=-865.51 \ln(x) + 959.60$ | 0.99 |

Çizelge Ek 20 Klorür konsantrasyonu (Cl⁻, mg/l)-derinlik (d, mm) bağıntıları (Beton)

| Numune Kodu | Ortam | Cl ⁻ Konsantrasyonu-d Bağıntıları | R |
|-------------|-------|--|------|
| C0 | M1 | $y = -629.21 \ln(x) + 698.13$ | 0.99 |
| C3 | | $y = -594.87 \ln(x) + 581.29$ | 0.93 |
| C6 | | $y = -313.69 \ln(x) + 316.35$ | 0.94 |
| C0 | M4 | $y = -765.34 \ln(x) + 872.77$ | 0.99 |
| C3 | | $y = -848.42 \ln(x) + 844.05$ | 0.95 |
| C6 | | $y = -730.23 \ln(x) + 714.47$ | 0.94 |

Çizelge Ek 21 Klorür konsantrasyonu (Cl⁻, mg/l)-derinlik (d, mm) bağıntıları (Beton)

| Numune Kodu | Ortam | Cl ⁻ Konsantrasyonu-d Bağıntıları | R |
|-------------|-------|--|------|
| 0-10 | M1 | $y = -312.48 \ln(x) + 751.63$ | 0.89 |
| 20-30 | | $y = -189.61 \ln(x) + 200.24$ | 0.92 |
| 45-50 | | $y = -13.89 \ln(x) + 33.63$ | 0.99 |
| 0-10 | M4 | $y = -89.33 \ln(x) + 910.35$ | 0.69 |
| 20-30 | | $y = -240.64 \ln(x) + 286.39$ | 0.97 |
| 45-50 | | $y = -41.175 \ln(x) + 56.26$ | 0.98 |



(a) Permeabilite deneyinin genel görünüşü



(b) Permeabilite numunesinin detay görüntüsü



(c) Su işleme derinliği

Şekil Ek 1 Permeabilite deneyi

Copyright of Geowebtech, Inc.



Http://www.geowebtech.com



(a) Basınç Deneyinin Genel Görünüşü



(b) Basınç Numunesinin Detay Görüntüsü

Şekil Ek 2 Basınç deneyi



(a) Yarma Deneyinin Genel Görünüşü

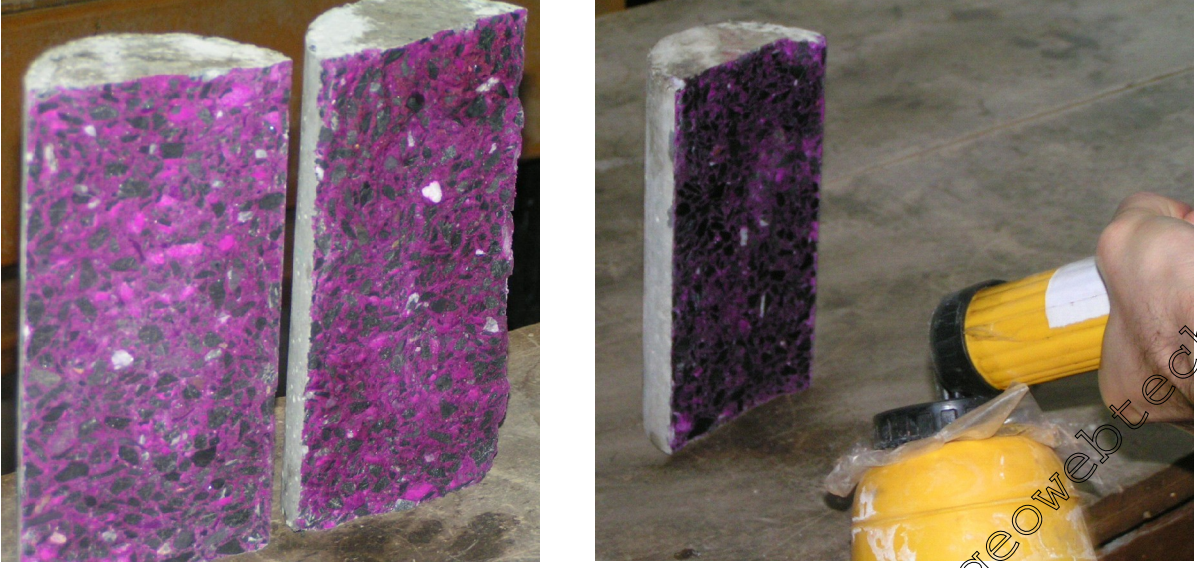


(b) Yarma Numunesinin Detay Görüntüsü



(c) Yarma Numunesi

Şekil Ek 3 Yarma deneyi



Şekil Ek 4 Karbonatlaşma derinliğinin belirlenmesi



Şekil Ek 5 Beton numunelerden toz çıkarılması



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil Ek 6 Toz numunelerde klorür konsantrasyonunun belirlenmesi



(a) Betonarme Numunelerin Genel Görünüşü



(b) Betonarme Numunelerin Detay Görüntüsü



(c) Betonarme Numunelerde Yarı Hücre Potansiyeli Ölçümü

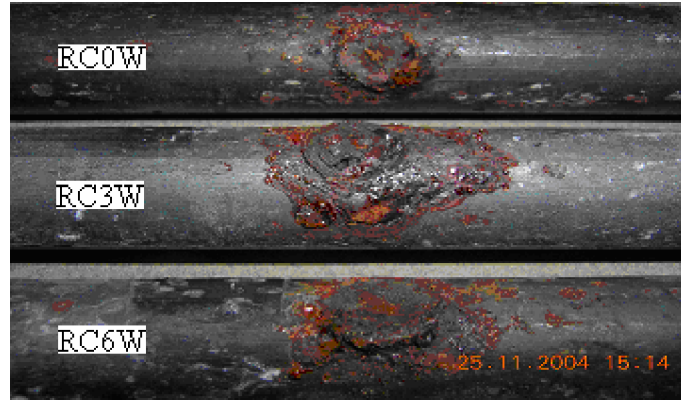


(d) Betonarme Numunelerde Makro Hücre Potansiyeli Ölçümü

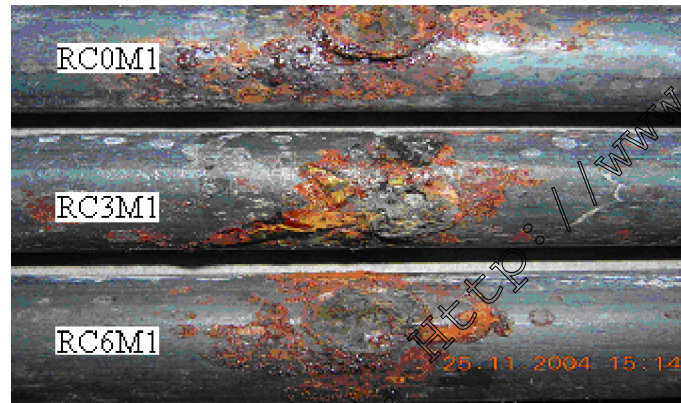
Şekil Ek 7 Betonarme numuneler ve potansiyel ölçümleri



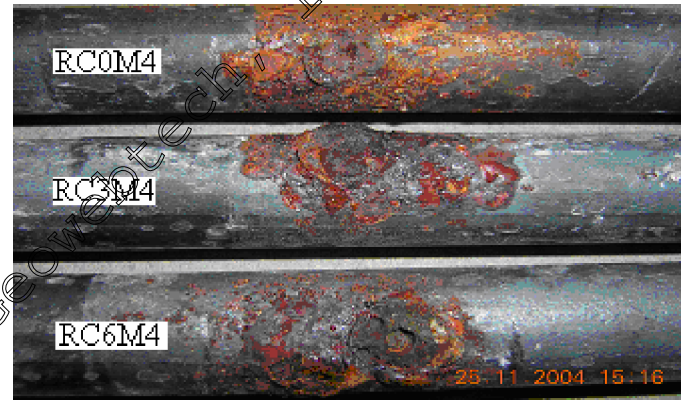
Şekil Ek 8 Betonarme Numunelerden Toz Çıkarılması



(a)



(b)



(c)

Şekil Ek 9 YFC oranının ve Cl⁻ iyon konsantrasyonunun etkisi

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 16.09.1973

Doğum yeri Uşak

Lise 1989-1991 Mersin Anadolu Lisesi

Lisans 1992-1997 Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 1998-2000 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Mekanik Programı

Doktora 2001-2006 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Yapı Programı

Çalıştığı kurumlar

1998-Devam ediyor YTÜ İnşaat Fakültesi Araştırma Görevlisi